

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«___» _____ 2020 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
технології та системи точної механіки»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»
на тему: «Двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент
автоматизованої системи стабілізації безпілотної літального апарату»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-61

Нічик Віталій Сергійович _____

Керівник:

д.т.н., проф

Безвесільна Олена Миколаївна _____

Консультант з технологічного розділу:

д.т.н., проф

Антонюк Віктор Степанович _____

Рецензент:

к.т.н., доцент

Шевченко Вадим Володимирович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент Нічик Віталій

Сергійович _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Приладобудівний факультет

Кафедра приладобудування

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи точної механіки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Нічику Віталію Сергійовичу

1. Тема проєкту «Двоканальний ємнісний МЕМС чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації безпілотного літального апарату», керівник роботи Безвесільна Олена Миколаївна д.т.н., проф. , затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. № 1180-с

2. Термін подання студентом проєкту 11.06.2020

3. Вихідні дані до проєкту: частота джерела живлення $f = 1200 \text{ Гц}$; напруга джерела живлення $U = 2 \text{ В}$; площа поверхні пластини $S = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; відстань між пластинами $\delta = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; середовище між обкладками ЄП — вакуум.

4. Зміст пояснювальної записки : Вступ; 1. Безпілотні літальні апарати, класифікація БПЛА; 2. Теоретичні відомості про автоматизований навігаційний комплекс(НК). Аналіз стану сучасної гравіметрії; 3. Ємнісні МЕМС гравіметри; 4. Математична модель, та аналіз основних похибок Двоканального ємнісного гравіметра; 5. Автоматизована система стабілізації безпілотного літального апарата; 6. Технологічний розділ; Висновки; Література.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): Формат А1 –вібростенд(складальний кресленик); формат А1 – деталювання; формат А1 – схема підключення ЧЕ; формат А1 – принципова схема ЧЕ.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Технологічний	д.т.н., проф. Антонюк В.С.		

7. Дата видачі завдання: 12.03.2020

Календарний план

з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури по темі	5.05.20	
2	Опис роботи та конструкції ЧЕ	20.05.20	
3	Складання мат моделі ЧЕ	25.05.20	
4	Основні розрахунки ЧЕ	30.05.20	
5	Розробка технологічного розділу	5.06.20	
6	Оформлення креслеників та схем	8.06.20	
7	Написання ПЗ до ДПБ	8.06.20	
8	Написання доповіді до захисту ДПБ	10.06.20	

Студент

В.С. Нічик

Керівник

О.М. Безвесільна

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту «Двоканальний ємнісний MEMC чутливий
елемент автоматизованої системи стабілізації безпілотної літального
апарату»**

**на тему: «Двоканальний ємнісний MEMC чутливий елемент
автоматизованої системи стабілізації безпілотної літального апарату»**

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт містить: 76 с., 6 табл., 26 рис., 2 дод. та 34 джер.

Сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко використовуються у багатьох країнах у різних сферах господарства. Вони є одним із перспективних напрямків розвитку наукового та технічного процесу багатьох розвинутих держав.

За інформацією міжнародної асоціації безпілотних систем UVSInternational, у 2013 році БПЛА виготовляли у 57 країнах світу. Така ситуація зумовлена швидким розвитком та широким спектром завдань безпілотників, виконання яких пілотованими літальними апаратами недоцільно і неможливо за різних причин.

Серед найбільш специфічних завдань БПЛА можна виділити:

- дистанційне зондування Землі;
- контроль комунікацій та кордонів;
- моніторинг повітряного простору;
- ретрансляція сигналів;
- розвідувальні роботи та ін.

Найбільше уваги при розробці нового БПЛА потребує система орієнтації та стабілізації. Система стабілізації БПЛА складається із однієї (інколи п'яти) гіростабілізованих платформ. Чутливим елементом в автоматизованій системі стабілізації у даній роботі буде слугувати прилад для вимірювання прискорення сили тяжіння а саме двоканальний мікроелектромеханічний ємнісний МЕМС гравіметр.

Ключові слова. БПЛА, МЕМС, гравіметр, ємнісний гравіметр, ДЄГ, система стабілізації.

ABSTRACT

Thesis contains: 76 p., 6 tables, 26 fig., 2 add. and 34 references.

Today, unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in many countries in various sectors of the economy. They are one of the promising areas of scientific and technical development of many developed countries.

According to the International Association of Unmanned Systems UVS International [1] in 2013, UAVs were manufactured in 57 countries. This situation is due to the rapid development and wide range of tasks of drones, the implementation of which by manned aircraft is impractical and impossible for various reasons.

Among the most specific tasks of the UAV are:

- remote sensing of the earth;
- control of communications and borders;
- airspace monitoring;
- signal retransmission;
- reconnaissance work, etc.

The system of orientation and stabilization needs the most attention when developing a new UAV. The UAV stabilization system consists of one (sometimes five) gyrostabilized platforms. A sensitive element in the automated stabilization system in this work will be a device for measuring the acceleration of gravity, namely a two-channel microelectromechanical capacitive MEMS gravimeter.

Keywords. UAV, MEMS, gravimeter, capacitive gravimeter, two-channel capacitive gravimeter, stabilization system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1 БЕЗПІЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ. КЛАСИФІКАЦІЯ БПЛА...14	
1.1. Конструкція БПЛА.....	14
1.2. Військові безпілотники.....	16
1.3. Цивільні безпілотники.....	17
1.4. Висновок до першого розділу.....	18
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО АВТОМАТИЗОВАНИЙ НАВІГАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС. АНАЛІЗ СТАНУ СУЧАСНОЇ ГРАВІМЕТРІЇ.....	19
2.1. Автоматизований навігаційний комплекс.....	19
2.2. Вимоги точності до сучасних гравіметрів НК.....	21
2.3. Види гравіметрів.....	23
2.3.1. Струнні гравіметри.....	23
2.3.2. П'єзоелектричні гравіметри.....	24
2.3.3. Гіроскопічні гравіметри.....	25
2.4. Порівняння існуючих видів гравіметрів.....	27
2.5. Висновок до другого розділу.....	29
РОЗДІЛ 3 ЄМНІСНІ МЕМС ГРАВІМЕТРИ.....	30
3.1. Огляд патентної бази по ємнісних гравіметрах.....	30
3.2. Ємнісний гравіметр.....	31
3.3. Ємнісний МЕМС гравіметр НК.....	32
3.4. Огляд ємнісних МЕМС акселерометрів.....	32
3.5. Принцип роботи ємнісних МЕМС акселерометрів.....	33
3.6. Висновок до третього розділу.....	35

					ЛПБ ПМ6112.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Нішук						
Перевірів		Бризгівський						
						НТУУ «КПІ» ПБФ		

РОЗДІЛ 4 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АНАЛІЗОСНОВНИХ ПОХИБОК ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО МЕМС ГРАВІМЕТРА.....	37
4.1. Рівняння руху ДЄГ в умовах установки на Землі.....	37
4.2. Рівняння руху ДЄГ в загальному випадку руху основи.....	39
4.3. Структурна схема ДЄГ.....	42
4.4. Конструкція МЕМС ДЄГ.....	44
4.5. Розрахунок основних параметрів МЕМС гравіметра.....	47
4.6. Склад та аналіз похибок МЕМС ДЄГ.....	47
4.7. Висновок до четвертого розділу.....	50
РОЗДІЛ 5 АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ.....	51
РОЗДІЛ 6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЄГ.....	54
6.1. Опис експериментальної установки.....	54
6.1.1 Досліджуваний ДЄГ.....	54
6.2. Градувальна характеристика ДЄГ.....	54
6.3. Визначення базових параметрів роботи макету.....	57
6.4. Проведення експерименту.....	57
6.5. Результати дослідження МЕМС ДЄГ.....	59
6.6. Висновки до шостого розділу.....	59
6.7. Визначення метрологічних характеристик.....	60
РОЗДІЛ 7 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ.....	62
7.1. Вступ до технологічного розділу.....	62
7.2. Визначення основних показників технологічності.....	63
7.3. Визначення додаткових показників технологічності.....	64
6.3.1. Технічні показники уніфікації конструкції.....	64
7.4. Визначення комплексного показника технологічного виробу.....	65
7.5. Розрахунок розмірної ланки двома методами.....	66
7.6. Розробка технологічного процесу складання.....	69
7.6.1. Розробка схеми складального складу.....	69

7.6.2. Розробка технологічної схеми складання.....	70
7.7 Висновки до технологічного розділу.....	71
ВИСНОВОК.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

1мГал – **1мГал** = **10^{-5} м/с²** (**1Гал** = **10^{-2} м/с²** = **1 см/с²**)

БПЛА – безпілотний літальний апарат

БЦОМ – бортова цифрова обчислювальна машина

ГГ – гіроскопічний гравіметр

ГСП – гіростабілізована платформа

ДЕ – демпфуючий елемент

ДЄГ – двоканальний ємнісний гравіметр

ЄГ – ємнісний гравіметр

ЛА – літальний апарат

МЕМС – мікроелектромеханічна система

ПЕ – пружний елемент

ПСТ – прискорення сили тяжіння

ПГ – п'єзогравіметр

СГ – струнний гравіметр

ЧЕ – чутливий елемент

d_i – п'єзоелектричний модуль

f_z – вихідний сигнал ПГ

g_z – проекція ПСТ на вісь чутливості ПГ

\ddot{h} – вертикальне прискорення ЛА

ξ – коефіцієнт демпфування

ω_0 – власна частота ПГ

γ_0 – довідкове значення ПСТ

Δg – аномалія прискорення сили тяжіння

ВСТУП

Безпілотні літаючі апарати (БПЛА) з кожним роком займають все значніше місце як у військовій так і цивільній сферах. За думками багатьох експертів у найближчий час безпілотна авіація буде домінувати над пілотною.

Серед переваг можна навести: відсутність екіпажу, відносно невелику вартість виробництва, малі затрати на експлуатацію і підтримання працездатного стану.

Сьогодні безпілотні літальні апарати широко використовуються у багатьох країнах у різних сферах господарства. Вони є одним із перспективних напрямків розвитку наукового та технічного процесу багатьох розвинутих держав.

За інформацією міжнародної асоціації безпілотних систем UVSInternational [1] у 2013 році БПЛА виготовляли у 57 країнах світу. Така ситуація зумовлена швидким розвитком та широким спектром завдань безпілотників, виконання яких пілотованими літальними апаратами недоцільно і неможливо за різних причин.

Серед найбільш специфічних завдань БПЛА можна виділити:

- дистанційне зондування Землі;
- контроль комунікацій та кордонів;
- моніторинг повітряного простору;
- ретрансляція сигналів;
- розвідувальні роботи
 - розвідка наземного, повітряного, водного простору;
 - радіаційна, хімічна, біологічна розвідка;
 - радіотехнічна розвідка;
- транспортні задачі.

Актуальність БПЛА підтверджує зростання попиту на них за останнє десятиліття.

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Велика кількість різноманітних досліджень і винаходів стали доступні через серйозні технологічні успіхи:

- поява нових матеріалів, які мають переваги у масі та міцності(композити);
- розвиток супутникових систем позиціонування(GPS);
- швидкий розвиток високоефективних поновлюваних джерел енергії(на основі літій-полімерних акумуляторів);
- розвиток обчислювальної техніки, поява нових інтерфейсів, операційних систем та алгоритмів;
- розвиток у сфері мікроелектронних компонентів: мікроконтролери, приймачі радіосигналів, системи навігації, орієнтації та стабілізації.

Швидкий розвиток мікро електромеханічних приладів на шляху зменшення їх розмірів і маси , дозволяє створювати сучасні навігаційні комплекси (НК) для БПЛА. Актуальним є використання такого НК для вимірювань гравітаційних аномалій Землі або прискорення сили тяжіння (ПСТ), дані про які можна використовувати для корекції інерціальних систем навігації або для розвідки корисних копалин у важкодоступних районах (гори, акваторії морів та океанів) та ін.

Найбільше уваги при розробці нового БПЛА потребує його система стабілізації, оскільки БПЛА використовується, в основному, при екстремальних умовах.

Система стабілізації БПЛА складається із однієї (інколи п'яти) гіростабілізованих платформ (ГСП).

Чутливим елементом в автоматизованій системі стабілізації (СС) у даній роботі буде слугувати прилад для вимірювання прискорення сили тяжіння а саме двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр(ДЄГ), який встановлюється на ГСП.

Точні дані гравітаційного прискорення (g) Землі необхідні для багатьох розвинутих галузей науки й техніки. В першу чергу для космічної та

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

авіаційної галузі. Гравіметри використовуються також у геології, для пошуку корисних копалин, які вносять збурення у прискорення сили тяжіння. Із розвитком БПЛА стає можливим високоточне визначення g та Δg важкодоступних для пілотованих ЛА.

Використання БПЛА дозволяє істотно зменшити витрати на обслуговування при проведенні гравіметричних зйомок.

Через довгу обробку результатів у декілька місяців при використанні відомих гравіметрів, а також недостатню точність та швидкодію існуючих гравіметрів, перспективним є побудова гравіметра на основі мікроелектромеханічних систем. Одним із відомих перспективних гравіметрів є ємнісний одноканальний гравіметр (ЄГ). Проте він має похибки обумовлені дією інструментальних похибок та вертикального прискорення.

Тому є перспективним двоканальний ємнісний МЕМС гравіметр (ДЄГ). Він має більшу точність ніж одноканальний ЄГ (за рахунок усунення інструментальних та інших похибок а також дії вертикального прискорення) а також більшу чутливість, малі габарити та простоту конструкції. На сьогоднішній день ДЄГ маловивченим і потребує досліджень, зважаючи на його перспективність.

РОЗДІЛ 1

БЕЗПІЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ. КЛАСИФІКАЦІЯ БПЛА

Дрони, або беспілотні літальні апарати(UAV – Unmanned Aerial Vehicle) – це літальні апарати, що не мають людини, яка керує засобом безпосереднь з середини пристрою. Тобто, це апарати, що здатні літати без пілота на борту. Управління виконується, або дистанційно через радіозв’язок, або автономно (за наперед заданим маршрутом). Перевагою дронів є те, що вони мають короткий час введення в експлуатацію, а також не потребують додаткової інфраструктури. Апарати, що були попередниками БПЛА, були в основному військовими. Першими країнами, що розпочали дослідження беспілотників, були: США, Німеччина, Росія, Великобританія та Ізраїль. Перший БПЛА використовувався Австрією у 1849р. Це були повітряні кулі, наповнені вибуховою речовиною, що використовувалися як бомби[2]. Одним із перших творців беспілотників був Чарльз Кеттерінг, який у співпраці з Елмером Сперрімом, Орвіллом Райт та Робертом Міліканем створив у 1915 році літак, названий «KetteringBug». Це був примітивний автоматичний літак, який на основі датчиків визначав його висоту (за допомогою барометра), пройденої відстань (виходячи з кількості обертів двигуна) та положення [3]. Перший цивільний беспілотник був виготовлений лише у 80-х роках ХХ ст. у Японії. На відміну від військових, які працюють переважно на двигунові внутрішнього згорання, цивільні використовують електромотор.

1.1 Конструкція БПЛА

Основним елементом є корпус, який повинен мати мінімальну вагу. Для забезпечення різних задач, існують різні конструкції корпусу, а також розташування двигунів. За кількістю робочих двигунів БПЛА можна розділити на такі групи[4]:

- Бікоптери – два двигуни;
- Трикоптери – три двигуни;

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Квадрокоптери – чотири двигуни;
- Гексакоптери – шість двигунів;
- Октокоптери – вісім двигунів.

Наступними важливими компонентами безпілотного літального апарату є двигун та гвинти. Вони являються основною силовою системою дрона. За допомогою крутного моменту, отриманого від двигуна, гвинти сприяють підйому літального апарату у повітря. За компоновкою двигунів БПЛА можна класифікувати як(рис. 1.1.):

- Двохгвинтові – один провідний гвинт;
- Х-подібні – найбільш поширена конструкція, провідними є два гвинти;
- Y-подібні – три гілки, складені в латинську букву «Y», де провідними можуть бути одна або дві гілки;
- V-подібні – рідкісне компонування двигунів, при якому провідні два гвинти. Розташування двигунів схоже на латинську літеру «V»;
- Н-подібні – рідкісне компонування, розташування двигунів із двома провідними у формі латинської літери «Н».

Для покращення конструкції дрона можуть бути використані подвійні гвинти(зверху та знизу від балок кріплення). Вони збільшують максимальне корисне навантаження на апарат, а також додають жорсткості всій конструкції вцілому. Подвійні гвинти за рахунок обертання в протилежних напрямках, врівноважують інерційну силу один за одним. Основним недоліком безпілотників являється живлення. Основним елементом живлення є батарея, яка за короткий період розряджається. Провокаючи сповільнення руху двигунів, як наслідок зниження висоти беспілотника. Зазвичай, батареї – це сукупність з декількох гальванічних елементів одного типу.

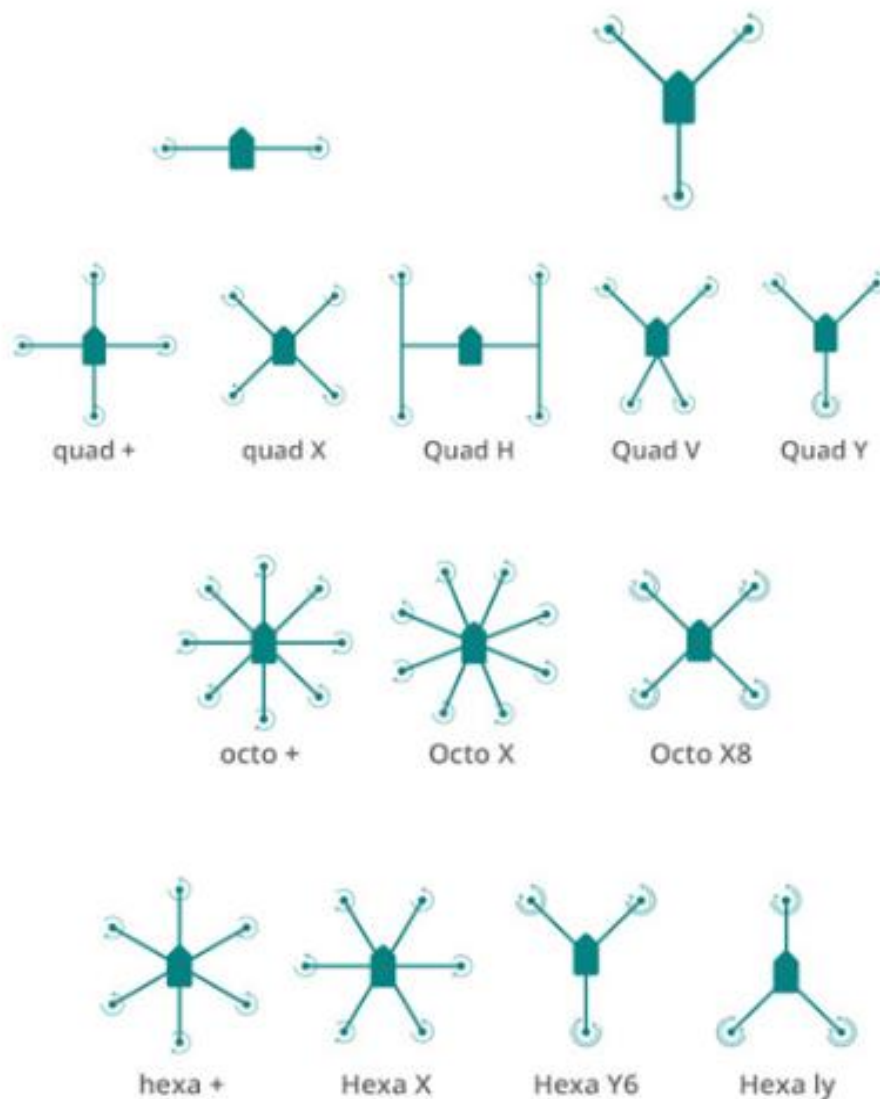


Рис. 1.1. Варіанти компонування двигунів[5]

1.2.Військові безпілотики

Безпілотики існують по часу так само, як і літаки. Оскільки завжди була думка про небезпеку польоту і збереження людського життя. Одними із найрозвиненіших у технологічній галузі побудови БПЛА є США. З їх сторони були певні спроби запровадити безпілотні апарати ще за Другої світової війни, проте плани зазнали поразки. Першою великою демонстрацією безпілотної авіації, була операція в Перській затоці 1991 року.

Типовим прикладом військового безпілотної авіації є MQ-1 Predator (М – багатоцільовий, Q – дрон), який відноситься до UCAV (Unmanned Combat Aerial Vehicle). Основною задачею цього літального

апарату є військова розвідка, тому основний акцент зроблений на високоякісних камерах високої роздільної здатності та тепловізорах.

Компоненти дрона такі[3]:

- Чотирьохциліндровий двигун внутрішнього згорання Rotax, потужністю 115 кінських сил;
- Антена зв'язку Ku-діапазону;
- Дві внутрішні GPS-антени та GPS-навігаційна система;
- Набори паливних елементів;
- Набір камер та кодерів;
- Слот для передавача, приймача та радіолокаційної антени.

Дрон є частиною комплексу, що включає[3]:

- Чотири безпілотники типу RQ-1 або MQ-1;
- Наземну станцію управління, яка зазвичай розміщується у транспортному засобі, де знаходиться пілот, а також оператор датчиків.

1.3 Цивільні безпілотники

Прикладом цивільних безпілотників є DJI Phantom Vision 2, який використовується для любительської фото- та відеозйомки. Апарат містить 1160 грамівий літій-полімерний гальванічний елемент, ємністю 5200 мАг. Це дозволяє підтримувати пристрій у стані польоту до 25 хв. Управління здійснюється радіохвилями з частотою 5,8 ГГц, дальність управління 300 м.. У разі втрати зв'язку пристрій забезпечений автоматичним поверненням на вихідну точку, за допомогою GPS-приймача із спеціальним програмним забезпеченням. Основною складовою безпілотника, що здійснює моніторинг – є камера, з роздільною здатністю 14 Мп. Для використання дрона у картографічних цілях, його можна обладнати спеціальним програмним забезпеченням. Простота використання БПЛА у важкодоступних регіонах є одним із його пріоритетів.

У таблиці 1.1. описано порівняння двох типів безпілотників: військового та цивільного[6].

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняння дронів

Feature	DJI Phantom View 2	GAAS MQ-1
Розмір (довжина x ширина x висота)	0.29 x 0.29 x 0.18 м 8 x 12 x 2м	0.29 x 0.29 x 0.18 м 8 x 12 x 2м
Без навантаження / стартова маса	1.36/2.6 кг 512/1020 кг	1.36/2.6 кг 512/1020 кг
Тривалість польоту	25 хв.	24-40 год
Тип приводу	Електричний / Пропелерний	Дизель / Пропелерний
Тип двигуна	Чотири електричні двигуни	Чотири поршневих двигуна Rotax 914 (115 KM)
Дальність дії	0,7-1 км	726 км
Максимальна швидкість	54 км / год	217 км / год
Довжина злітно-посадкової смуги	0 м (вертикальний зліт)	1500 м
Екіпаж	1 людина	2-3 особи
Ціна	800 \$	4 млн. \$ / 20 млн. \$
вартість 1 дрона / вартість системи (4 літаки, наземна станція управління, супутникова антена з аксесуарами)		

1.4Висновок до першого розділу

Проведено огляд матеріалів по безпілотним літальним апаратам.

Розглянуто типи БПЛА по конструкції, а також по компонування двигунів.

Визначено основні напрямки роботи БПЛА, а також порівняння двох типів безпілотників: цивільних та військових.

РОЗДІЛ 2.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО АВТОМАТИЗОВАНИЙ НАВІГАЦІЙНИЙ КОМПЛЕКС

2.1 Автоматизований навігаційний комплекс

Для визначення прискорення гравітаційного поля Землі у важкодоступних регіонах можна використовувати навігаційний комплекс (НК) БПЛА. Його точність на пряму залежить від точності чутливого елемента, у нашому випадку гравіметра. НК БПЛА дозволяє швидше та точніше визначити значення g та Δg , дані про які відразу вводяться до блока керування (БК) НК, що суттєво впливає на точність визначення параметрів.[38]

Гравіметр – прилад для вимірювання прискорення вільного падіння g або його аномалій Δg . Не зважаючи на те, що гравіметр є багатопрофільним приладом, на практиці майже у 100% випадків він використовується у гео- та гравірозвідувальних роботах. Завдяки георозвідці можна визначати наявність корисних копалин у надрах без буріння, та інших фізичних робіт. Тому такий спосіб дозволяє істотно зменшити бюджет робіт, за рахунок уникнення зайвого буріння свердловин або побудови шахт.

Типовою ілюстрацією роботи гравіметра є, наприклад, карстові воронки (рис.2.1.), над якими сила тяжіння менше, тому показання гравіметрів стають нижче; в той час як над щільними породами руди покази гравіметрів вище, так як над важкими об'єктами прискорення сила тяжіння зростає.[7]

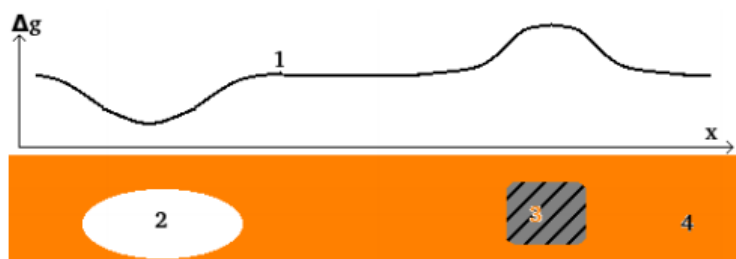


Рис.2.1.[7] Ілюстрація роботи гравіметра: 1 – графік сили тяжіння, 2 – карстова воронка, 3 – щільне рудне тіло, 4 – порода поверхні.

Розглянемо принцип роботи НК. НК складається з підсистем, які виконують такі основні функції: вимірюють питому силу, стабілізують вісь чутливості гравіметра у положенні вертикалі, визначають координати місцезнаходження і швидкості, вимірюють висоту, здійснюють обчислювальні операції [8].

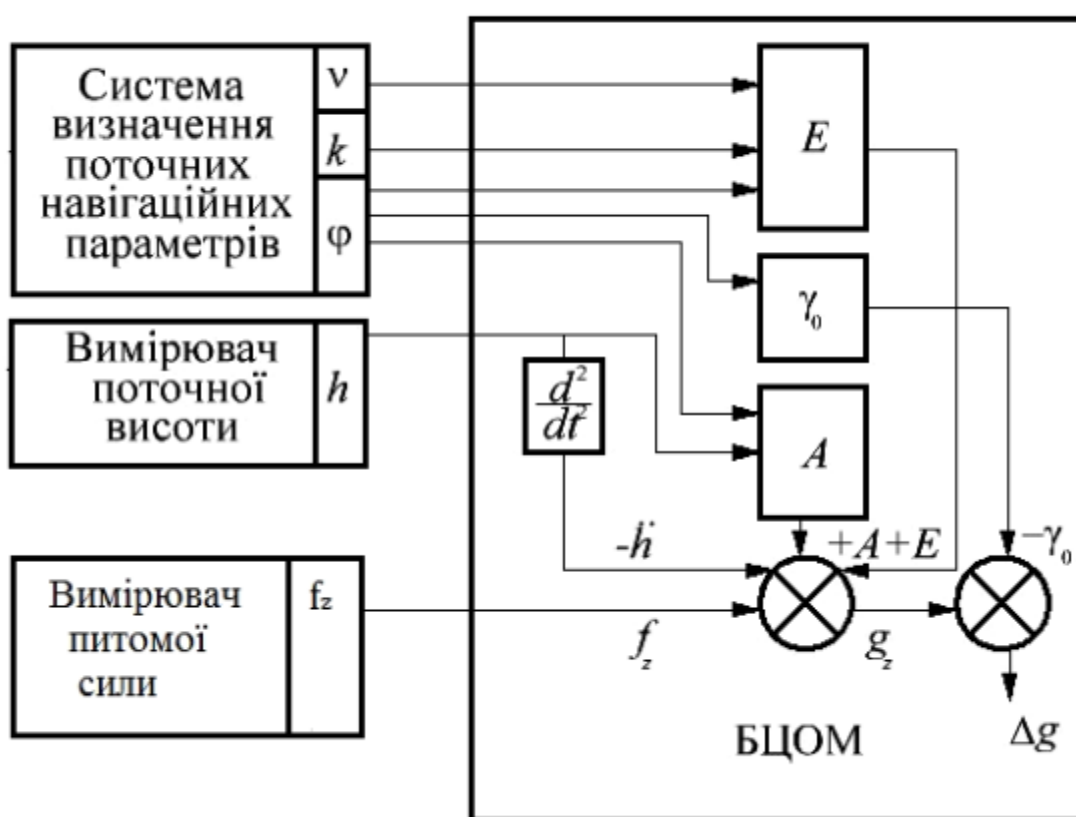


Рис. 2.2.. Функціональна схема НК[8]

Функціональна схема НК представлена на рис.2.2., на якій зображено здобуття інформації про g або Δg із сукупності корисного сигналу і сигналів-завад[8].

У сучасних методах вимірювання прискорення сили тяжіння розрізняють два основних типи [9]: статичні, величина розтягу пружного елемента вантажем показує вимірюване значення; та динамічні, в яких у полі сили тяжіння спостерігається рух вантажу.

Методи визначення прискорення сили тяжіння (ПСТ) бувають абсолютні і відносні. До абсолютних відносяться ті, що дозволяють визначити абсолютну, тобто повну, силу тяжіння. У цьому випадку, вимірюють не лише час, а й лінійні відстані – довжину маятника або шлях, який був пройдений вільнопадаючим тілом.

До відносних відносяться методи, що дозволяють визначити приріст (різницю значень) прискорення сили тяжіння (ПСТ) відносно деякої вихідної точки. Динамічні методи вимірювання ПСТ можуть бути і абсолютними, і відносними, статичні тільки відносними [9].

У [9] описуються такі основні методи вимірювання g :

1. Балістичний метод: залежність шляху, пройденого вільнопадаючим тілом від g ;
2. Маятниковий метод: зв'язок величини ПСТ з періодом власних коливань маятника постійної довжини;
3. Струнний метод: залежність частоти коливань струни від прискорення сили тяжіння. Три попередні методи передбачають спостереження руху тіла, тому вони є динамічними;
4. Пружинний метод: число зміни положення рівноваги у пружинних вагах, де зважується вантаж сталої маси. При зміні прискорення сили тяжіння виникає деформація пружного елемента вагою, яку вимірюють. Такий метод вимірювань називають статичним.

Гравіметр у якого маса робить переміщення в одному напрямку, називається гравіметром I роду. Гравіметр у якого маса переміщується відносно деякої точки підвісу, називається гравіметром II роду.

2.2. Вимоги точності до сучасних гравіметрів НК

До складу обладнання для проведення аерогравіметричних робіт входять [9,10]:

1. Авіаційний гравіметр.

Високоточний гравіметр повинен мати високу стабільність нульового сигналу протягом всього часу запланованої роботи, що становить на практиці декілька годин, стабільність до вібрації, а також частоту видачі даних

не більше 1Гц. Вимірювальна вісь пристрою повинна точно співпадати з місцевою вертикаллю. При недотриманні умови точної вертикальної орієнтації, горизонтальні прискорення, що виникають при русі апарату проектуватимуться на вимірювальну вісь гравіметра та буддуть створювати похибки вимірювання. Тому для стабілізації вертикальної орієнтації гравіметр встановлюють на гіростабілізовану платформу.

2. Гіростабілізована платформа.

Гіростабілізована платформа(ГСП) на виході повинна мати похибку стабілізації вимірювальної осі не більше 30-40 кут. секунд протягом всього часу польоту. Для зменшення вібрації на вимірювальний гравіметр, гіростабілізовану платформу встановлюють на демпфований підвіс, а також забезпечують розташування близько до центру мас БПЛА.

3. Приймач та авіаційна антена навігаційної системи.

Для розрахунків поправок на висоту та прискорення Коріоліса а також визначення вертикального прискорення руху БПЛА використовують супутникову навігаційну систему(GPS).

4. Комп'ютер.

Захист комп'ютера від ударів та вібрацій, є основною характеристикою його вибору.

5. Допоміжне обладнання на борту БПЛА.

Необхідний блок безперервного живлення для гравіметра а також пульт управління роботою аерогравіметричної системи.

6. БПЛА обладнаний точним автопілотом.

Стабільність польоту, а також точність ходу основні параметри при виборі літального апарату. Тому використання точного автопілота дозволяє точно налаштовувати параметри курсу.

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7. Базові станції супутникової навігації.

Щоб підвищити точність визначення координат БПЛА система навігації працює у диференціальному режимі. Тобто використовуються

також базові наземні станції.

2.3 Види гравіметрів.

2.3.1. Струнні гравіметри

Принцип дії струнних гравіметрів оснований на фізичні властивості струни змінювати власну частоту коливань. Простіше кажучи частота коливання струни пропорційна прискоренню сили тяжіння. Серед відомих зразків струнних гравіметрів можна навести [10] гравіметр, розробки ВНДІ Геофізики під керівництвом Лозинської А.М. Проте за рахунок рідинного демпфування йому притаманні деякі недоліки: виникнення систематичних похибок, резонанс окремих деталей при вібраціях, за рахунок вертикальної конвекції потоків рідини підвищується значення динамічного температурного коефіцієнту. Струнний гравіметр при простому виконанні має нелінійну характеристику, а також недостатню точність 5-8 мГал.

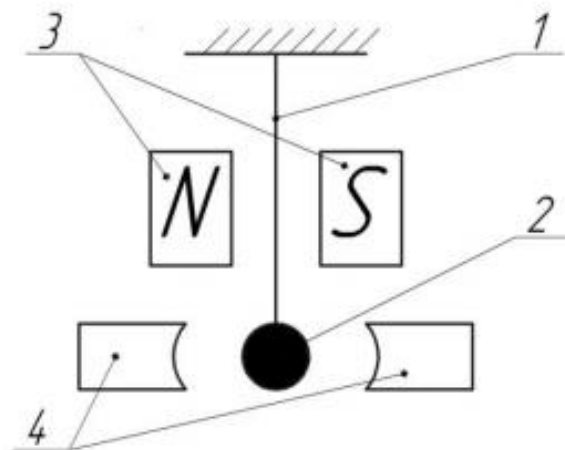


Рис. 2.3. Узагальнена схема СГ[11]

На рис. 2.3. можна побачити узагальнену схему струнного гравіметра. Між полюсами постійного магніта 3, на струні 1 підвішена маса 2. Під дією ПСТ (g) створюється сила mg , під дією якої струна починає коливатись з певною частотою.

Якщо на кінець струни подати змінну напругу, вона почне створювати незатухаючі коливання. В результаті можна визначити частоту коливань струни, шляхом порівняння частоти генератора із частотою еталонного генератора.

Переваги СГ: частотний вихідний сигнал, висока чутливість, мала величини сталої часу а також великий діапазон вимірювання вхідної величини.

Недоліки СГ: у простому виконанні – нелінійна вихідна характеристика, тому можуть виникати систематичні похибки, при деяких частотах вібрацій виникають резонанси окремих елементів, що веде до відхилень у показаннях, динамічний температурний коефіцієнт[11,12].

2.3.2. П'єзоелектричні гравіметри

П'єзоелектричні перетворювачі не можливо використувати для вимірювання статичних, або повільно-плинних зусиль, оскільки з часом падає напруга на виході. У п'єзоелектричних приладах використовують кристали, що мають п'єзоефект(прямий та обернений). П'єзоефект полягає у виникненні заряду на гранях пластини виконаної з п'єзоматеріалу. Знак заряду залежить від типу деформації, при зміні від розтягу то стиску знак змінюється на протилежний. Обернений п'єзоефект виникає, якщо п'єзопластину помістити у електричне поле, тоді її розміри будуть змінюватись пропорційно змінам параметрів поля.

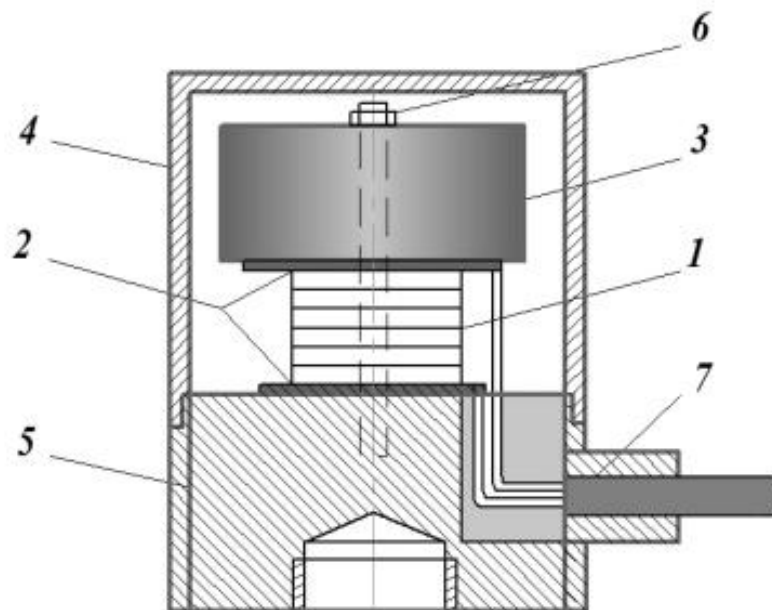


Рис 2.4. Схема п'єзоелектричного гравіметра.[11]

На кафедрі приладобудування КПІ ім.Ігоря Сікорського під керівництвом Безвесільної О. М. розроблено та досліджено п'єзоелектричний гравіметр (ПГ) зображений на рис.2.4. П'єзопакет 1, що складається із шарів кристалічного ніобату літію, є чутливим елементом. На торцях п'єзопакету розміщені ізолятори 2 та маса 3. Чутливий елемент притиснений до основи 4 гвинтом 6, щоб покращити стійкість та міцність конструкції. Кабель 7 слугує для з'єднання із операційним підсилювачем[11].

Переваги ПГ: зручний вихідний сигнал, малі габарити та вага, мала стала часу та висока чутливість.

Недоліки ПГ: У простому виконанні використовується лише для швидкоплинних процесів.

2.3.3. Гіроскопічні гравіметри

Гіроскопічний гравіметр складається із гіроскопічного маятника, який зв'язаний із рамою горизонтально осовим підвісом, котрий є перпендикулярним до осі обертання гіроскопа. У Массачусетському технологічному інституті [13] було розроблено гравіметри PIGA. Він характеризується високою чутливістю та використовуються у гравіметричних комплексах, мають точність 3-5мГал. Проте суттєвим їх недоліком є необхідність забезпечення точного напрямку осі чутливості

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

гравіметра відносно гравітаційного поля Землі. . На кафедрі приладобудування НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» під керівництвом Безвесільної О.М. розроблено та досліджено ГГ на основі гіроскопічного інтегратора лінійних прискорень - гіроскопічний вимірювач лінійного прискорення (ГІЛП), зображений нарис.2.5. Він складається з берилієвого ротору 2, який є елементом гіромотору 1. Розташування якого забезпечує маятниковість відносно осі внутрішнього підвісу 12. Поворотна платформа 6 виконує роль зовнішньої рамки. На ній розміщено стійки з підшипниковими вузлами для кріплення осі внутрішнього підвісу гіромотору 12, до якої прикріплено ротор датчика 3 кута β повороту гіромотору. На платформі 6 встановлено статор датчика 3. Для гасіння кутових коливань конструкцією передбачено рідинний демпфер 5. Сигнал з датчика 3 підсилюється і направляється на датчик моменту 7. Обертний момент є пропорційним до кута β . Світлонепроникнена мембрана 10, розташована на поворотній платформі 6, радіально зміщена і має щілину, через яку надходить світло з джерела 11. При проходженні світлового променя над фотоприймачем 8, виникає короткий імпульс, що означає повний оберт поворотної платформи 6 навколо осі 12. Точність відліку рівна 5 мкрад. Цей імпульс (сигнальний вихід гірогравіметра) надходить до блока електронних лічильників через підсилювач 9. Додатковий магнітний захист забезпечується алюмінієвим захисним корпусом [7,14].

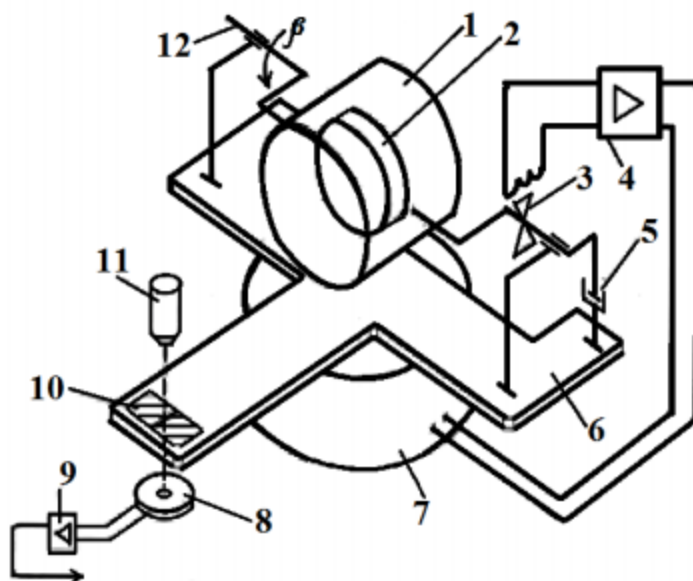


Рис.2.5. Гірогравіметр[14]

Переваги ГГ: вібростійкість, відсутність впливу горизонтальних перехресних віброприскорень, незалежність від постійної напруги.

Недоліки ГГ: складність конструкції, необхідна точна стабілізація чутливої осі, поява різних збурюючих моментів, що зменшують точність[11,14].

2.4.Порівняння існуючих типів гравіметрів.

Порівняльний аналіз розглянутих гравіметрів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1.[7]

Порівняльна характеристика існуючих гравіметрів та перспективних розробок

Тип гравіметра	Приклади	Принцип дії	Переваги	Недоліки	Висновок
Кварцовий	“Чекан-АМ”	Маятниковий момент діє на кварцову пластину, у результаті чого виникає електричний заряд, пропорційний ПСТ	Похибка від впливу горизонтальних прискорень практично виключена	Велика постійна часу, не використовуються для вимірювань постійних та повільно змінних сигналів, недостатня точність (2-3мГал).	Недоцільно використовувати
Пружинний	L-R-S «ScintrexCG-5 Autograv»	Компенсація моменту за допомогою вертикальної пружини	Відсутність впливу температури, тиску, магнітного поля, автоматичне шумо-заглушення, низький залишковий дрейф, мала вага	Важкопрогнозований дрейф пружинних властивостей пружинного елементу; недостатня точність (2- 3мГал)	Недоцільно використовувати
Магнітний	МАГ-1А (GT-1А), TAGS-6	Компенсація моменту, створеного ПСТ, за допомогою магнітної або електромагнітної пружини	Малі габарити та вага, зручний вихідний сигнал, висока чутливість, мала стала часу	Нестабільність магнітних властивостей постійного магніту; недостатня точність (2-3мГал)	Недоцільно використовувати
П’єзо-електричний	Тільки наукові прототипи	ПСТ стискає п’єзоелектричні пластини, на їх гранях виникає електричний заряд, пропорційний діючій силі	Малі габарити та вага, зручний вихідний сигнал, висока чутливість, мала стала часу	У простому виконанні можна використовувати тільки для реєстрації швидкоплинних процесів; недостатня точність (2-3мГал)	Недоцільно використовувати
					Арк
					28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ

Струнний	“Гравітон-М”	Вимірювання ПСТ зводиться до вимірювання частоти коливання струни, яка змінюється залежно від сили її натягу	Частотний вихідний сигнал, який можна точно виміряти та проінтегрувати висока чутливість, мала стала часу, майже необмежений діапазон вимірювання вхідних величин	Нестабільність пружних властивостей струни; нелінійність та можливість резонансів у простому виконанні; недостатня точність (2 мГал), чутливість до змін вібрацій та температури, вплив барометричного ефекту	Недоцільно використовувати
Гіро-скопічний	PIGA 16, 25; Гіро-гравіметр (науковий прототип)	Маятниковий момент перетворюється у гіроскопічний момент. Вихідний сигнал пропорційний прискоренню сили тяжіння	Вібростійкість, відносно висока чутливість, незалежність від постійної напруги чи низько-частотних параметричних умов електроніки	Недостатня точність (2-3 мГал), висока вартість, складність конструкції, наявні інструментальні похибки, необхідність дуже точної стабілізації осі чутливості; необхідні допоміжні пристрої	Недоцільно використовувати
Ємнісний одно-канальний	Тільки наукові прототипи	Дія ПСТ перетворюється у зміну зазору між пластинами, а потім у зміну вихідної напруги	Лінійність, стійкість показань, малі габарити та вага, висока чутливість	Наявність залишкових інструментальних похибок, та похибок від вертикального прискорення, необхідно використовувати підсилювач, наявність власних шумів; недостатня точність (1 мГал)	Недоцільно використовувати

2.5 Висновок до другого розділу

У цьому розділі було проведено аналіз характеристик сучасних авіаційних гравіметрів. Було виявлено ряд недоліків, серед яких: низька точність (2-8 мГал); необхідність фільтрування вхідного сигналу, для зменшення похибок; нелінійна вихідна характеристика; наявність похибок від дії вертикального прискорення та інструментальних похибок; мала швидкість обробки даних. Було визначено, що для сучасного гравіметра необхідна точність у 0,5 мГал.

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

РОЗДІЛ 3.

ЄМНІСНІ МЕМС ГРАВІМЕТРИ

3.1.Огляд патентної бази по ємнісних гравіметрах.

Досягти високу точність[15] ємнісного гравіметра можна тільки при використанні компенсаційного методу, коли ємнісний перетворювач виконує роботу нуля-органу у системі компенсації гравіметра. При прямому методі динамічний діапазон становить близько 0,2 мГал, що є недостатнім для нормального функціонування і високоточних вимірювань у цілому.

Гравіметр рис.3.1 [15] складається із демпфованої кварцової чутливої системи 1, ємнісного перетворювача, що складається із двох пар нерухомих 2 та однієї пари рухомих 3 вертикальних пластин, комутатора 4, котушки індуктивності 5, виконаної на тороїдальному осерді, ВЧ-генератора 6, диференціального перетворювача частота-код 7, регістра 8, суматора 9, перетворювача код-число імпульсів 10, реверсивного лічильника 11, R-Стригера 12 таблока управління 13[7,16].

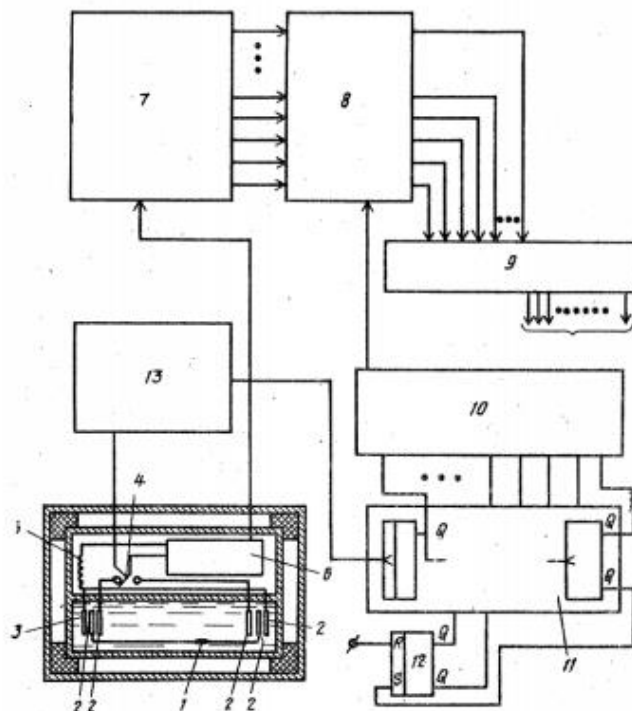


Рис.3.1 Схема гравіметра[16]

У даного гравіметра підвищення точності досягається за рахунок зменшення дрейфу нуля та збільшення діапазону лінійності. Недоліками є складність конструкції а також відсутність компенсації вертикального інерційного прискорення, яке має найбільший вплив на утворення похибок.

3.2.Ємнісний гравіметр

Одним із найбільш перспективних чутливих елементів навігаційного комплексу є ємнісний чутливий елемент або гравіметр.

Принцип дії його полягає у тому, що прискорення сили тяжіння перетворюється у зміну відстані між пластинами, а потім –у пропорційну зазору зміну вихідної напруги. На кафедрі приладобудування НТУУ “КПІ” розроблено та досліджено одноканальний ємнісний гравіметр (ЄГ) рис.3.2[4].

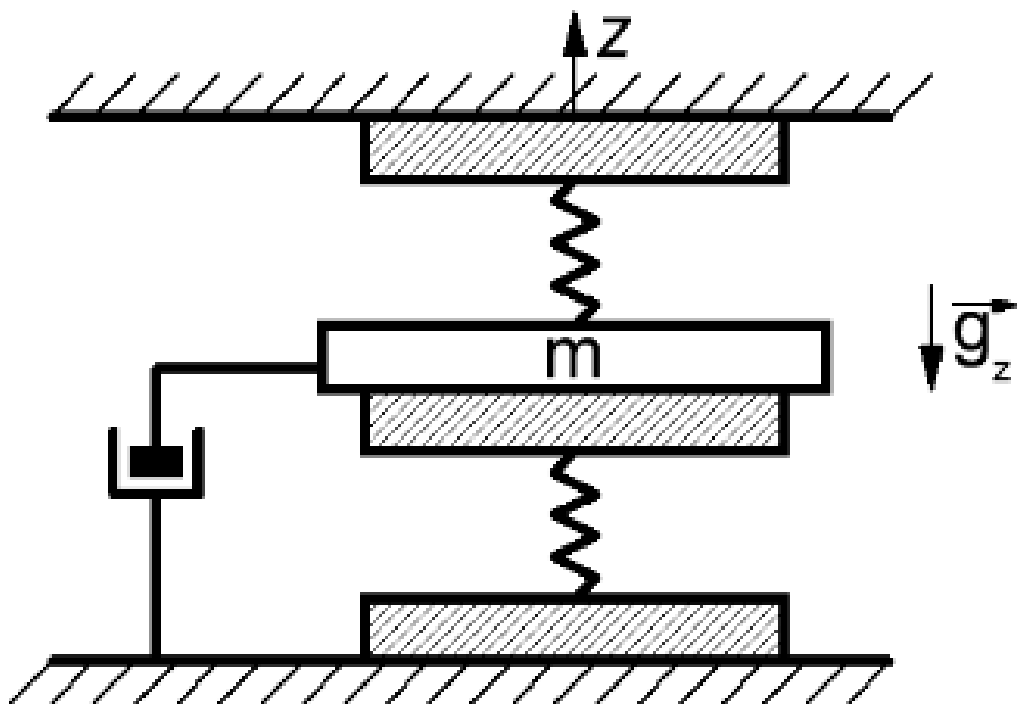


Рис.3.2 Принципова схема одноканального ЄГ[5]

Ємнісний гравіметр складається з ЧЕ, виконаного у вигляді двох металевих обкладинок, розділених між собою діелектриком. Нижня

обкладинка з'єднана пружною мембраною, до якої прикріплена маса, а верхня з герметичним корпусом. Ці обкладинки, утворюють конденсатор, що має змінний зазор δ та ємність q . Маса під силою тяжіння починає рухатись і згинати мембрану, чим змінює зазор δ між верхньою та нижньою обкладинками, а отже, і значення ємності q , яка обернено пропорційна прискоренню g_z . Параметри чутливого елемента ємнісного гравіметра підібрані так, що частота його власних коливань дорівнює найбільшій частоті гравітаційних прискорень, яка може бути виміряна на фоні завад. Тобто, чутливий елемент гравіметра виконує також функції фільтра низьких частот [7].

Основні переваги ЄГ: лінійність вихідної характеристики, малі габарити та вага, доволі висока чутливість та стійкість показань.

Основні недоліки ЄГ: невелика потужність вихідного сигналу; наявність шумів; недостатня точність (1 мГал); наявність залишкових похибок [11,17,18].

3.3. Ємнісний MEMS гравіметр НК

Проведені в лабораторії вимірювальних перетворювачів дослідження показали перспективність застосування в якості гравіметра НК нового ємнісного MEMS акселерометра [7].

3.4. Огляд ємнісних MEMS акселерометрів

Одним з основних елементів MEMS є актюатори – вузли, які виконують функцію перетворювача енергії з одного виду на інший (в основному, на механічну). Для створення цих вузлів можуть бути використані різні фізичні явища, і їх загальна кількість невідомо зростає. Часто застосовуються електростатичні, термоелектричні, п'єзоелектричні, осмотичні, гідравлічні, пневматичні, електромагнітні та інші типи актюаторів [37].

Звичайно, кожен з цих видів має переваги для якогось конкретного випадку їх використання, що зумовлено технологічними умовами та конструкторським рішенням [7,19].

Те саме можна сказати і про використання інших типів перетворювачів у приладах МЕМС. Різноманітність наявних типів сенсорів в озброєнні конструктора значно ширше та різноманітніше, що зумовлено частим багатоплановим застосуванням МЕМС.

3.5.Принцип роботи ємнісних МЕМС акселерометрів

Ємнісні перетворювачі часто використовуються для вимірювання прискорень та переміщень різноманітних механічних елементів[5]. У більшості випадків сам перетворювач має вигляд гребневих електродів, що своїми пальцями входять у міжпальцеві проміжки іншого гребеневого електрода. Іншою поширеною конструкцією ємнісного перетворювача є дві пластини, одна з яких рухома, а інша – ні. Рухомою може бути наприклад, мембрана чи пружна балка тощо. Робота ємнісного перетворювача забезпечується зміною відстані між пластинами чи площі перекриття цих поверхонь, що розміщені у безпосередній близькості[21,37].

Всі елементи та вузли багатьох МЕМС можна розділити на дві групи: група основних елементів та вузлів, призначених для безпосереднього виконання основної функції, заради якої було створено цей прилад, та інша група – група допоміжних елементів та вузлів, призначених для забезпечення працездатності основної групи.[37] Як приклад, можна навести більшість вище перелічених перетворювачів, які слугують для перетворення переміщень пружних первинних вимірювальних перетворювачів: пружних балок, мембран, пружин, стержнів, струн тощо[20].

Ємнісні МЕМС - акселерометри, вироблені компаніями AnalogDevices, Bosch, Delphi, Denso, Freescale, Kionix, SiliconDesigns, ST Microelectronics, VTI Technologies займають лідируючі позиції на сучасному ринку [7].

Принцип дії ємнісного акселерометра заснований на зміні ємності чутливого елемента з електродами при переміщенні інерційної маси, що є його частиною, під дією ПСТ[5]. У більшості MEMC - акселерометрів прискорення змінює відстань d між обкладками і тим самим, - ємність конденсатора. Сенсор перетворює зміну ємності акселерометра в електричний заряд, напругу або струм, що є вихідним сигналом. Ємнісний сенсорний елемент складається з двох фіксованих електродів. Між ними підвішена рухома обкладка, навантажена інерційною масою, яка являє собою загальний електрод ємнісного півмоста (рис.3.3. а-в)[37].

Диференціальний режим з'єднання двох конденсаторів $C1$ і $C2$ (рис.3 в) дозволяє збільшити амплітуду і поліпшити лінійність сигналу [7].

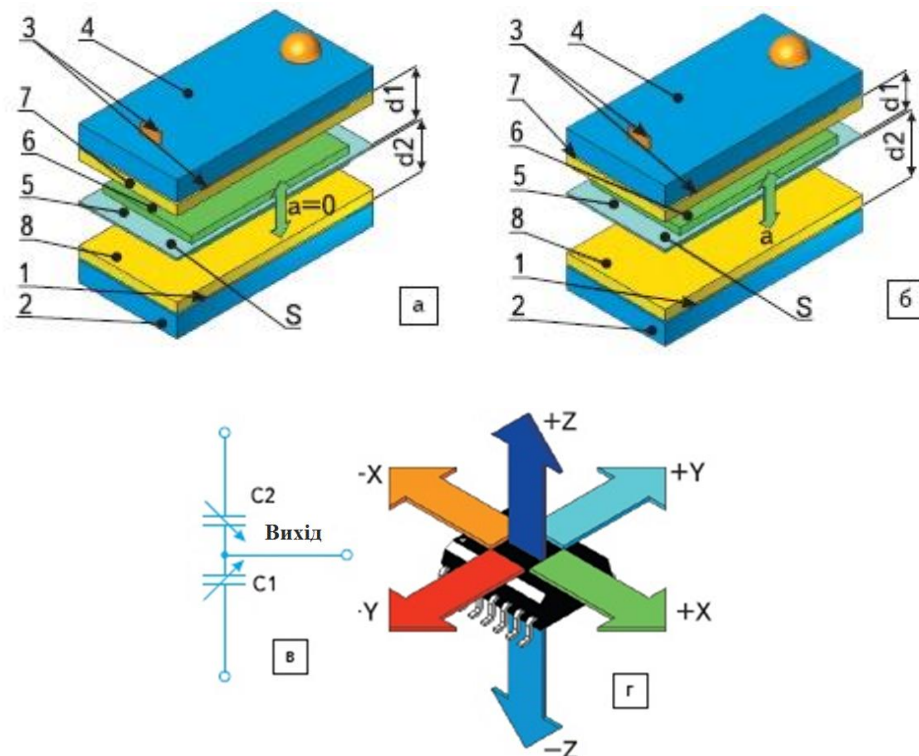


Рис. 3.3. Ілюстрація вимірювального принципу диференціального ємнісного акселерометра [8];

а, б - фізична модель вимірювальної структури (корпус перетворювача умовно не показаний): 1, 3 - нерухомі металеві обкладки; 2, 4 - зафіксовані друковані плати; 5 - рухома обкладка; 6 - інерційна маса (метал або

діелектрик); 7, 8 - шари діелектрика; S - фіксована площа перекриття обкладинок; d1, d2 - змінні відстані між обкладинками; а - акселерометр у стані спокою; б - під дією прискорення а; в - еквівалентна електрична схема; г - розміщення вимірювальних осей і ступенів свободи (півосей) відносно корпусу ІС у корпусі SOIC [7]

Майже всі диференціальні ємнісні акселерометри об'єднують електроніку і обробляють сигнал, використовуючи такі співвідношення: $C1/C2$ або $(C1 - C2)/(C1 + C2)$. Пояснити допоможе формула для ємності плоского конденсатора[36]:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

де ε - відносна діелектрична проникність матеріалу;

ε_0 - діелектрична постійна;

S - площа перекриття обкладинок;

d - відстань між обкладинками.

Переваги і недоліки ємнісних перетворювачів впливають з їх фізичної природи. Так, ємнісні структури прості у конструюванні - залежно від розміщення ємнісного чутливого елемента щодо друкованої плати, вони дозволяють детектувати прискорення у напрямку будь-який з шести ступенів свободи (рис.3.3г). З розвитком технологій МЕМС дана перевага доповнилася можливістю детектувати тривимірні осі[7,8].

3.6 Висновки до третього розділу

У даному розділі було виконано патентний пошук по ємнісних гравіметрах. Пошук показав недостатню точність існуючих нині ємнісних гравіметрів (5-8мГал), високу вартість, складність конструкції, а також неповне виключення основної перешкоди – вертикального інерціального прискорення та залишкових інструментальних похибок. Показано і підтверджено доцільність використання МЕМС-технологій у

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приладобудування і у розробці ємнісного гравіметра також. Перевагами останнього є точність, висока технологічність, мале енергоспоживання, низька вартість.

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПОХИБОК ДВОКАНАЛЬНОГО ЄМНІСНОГО МЕМС ГРАВІМЕТРА

4.1 Рівняння руху ДЄГ в умовах установки на Землі

Розглянемо коливальну систему одного ЄГ, представлену на рис. 4, де позначено: інерційна маса (IM), коефіцієнт пружності k та демпфуючий елемент ($ДЕ$). У якості демпфуючого елемента виступає повітря, що створює опір рухові IM . Елемент жорсткості характеризується пружними властивостями ЄГ [7].

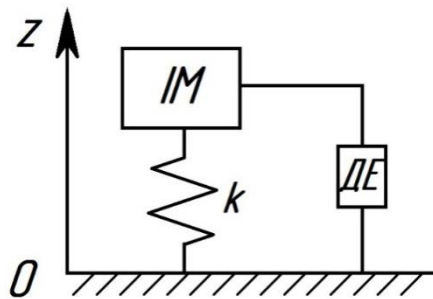


Рис. 4.1. Коливальна система ЄГ[7]

Запропонована схема справедлива за таких умов:

- рух IM розглядається в інерціальній системі відліку і відбувається лише в одному напрямку – вздовж осі $0-z$, перпендикулярної площині встановлення ЄЧЕ;
- опора, IM та інші складові ЄГ є недемпфованими;
- маса пружного елемента набагато менша за IM ;
- у межах можливих коливань, сила пружності пропорційна деформації пружного елемента.

Під час руху IM на неї діє інерційна сила від дії вертикального прискорення БПЛА (F_i) сила опору руху IM (F_{op}) та сила пружності (F_{np})[7]:

$$F_i = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (2)$$

$$F_{op} = -n \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

$$F_{np} = -\kappa x, \quad (4)$$

де n – коефіцієнт затухання;

κ – коефіцієнт пружності пружного елемента;

x – зміщення ІМ ЄГ відносно положення рівноваги.

Відповідно із другим законом Ньютона, рух ІМ із прискоренням g_z забезпечує сила:

$$G = mg_z, \quad (5)$$

де G – сила, яка діє на ІМ; m – величина ІМ.

Кінцеве рівняння руху ЄГ із врахуванням (1) – (4) матиме вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + \kappa x = -mg_z. \quad (6)$$

Зважаючи на інерційність конструкції ЄГ, двома першими складовими у рівнянні (6) будемо нехтувати.

Отримаємо

$$\kappa x = -mg_z. \quad (7)$$

Отже, рівняння руху одноканального ЄГ на Землі, буде [20]:

$$g_z = -\frac{\kappa}{m} x.$$

Вихідна напруга одноканального ЄЧЕ u_1 буде пропорційна зміщенню ІМ x . Вихідний електричний сигнал одноканального ЄГ буде

$$u_1 = k(mg_z).$$

Для двоканального ЄГ на ємнісні елементи обох каналів діє прискорення g_z . Для ДГ вихідні сигнали будуть:

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$u_1 = k(mg_z); \quad (8)$$

$$u_2 = k(mg_z), \quad (9)$$

де u_1 – вихідний електричний сигнал ємнісного елементу ЄЧЕ1 одного каналу,

u_2 – вихідний електричний сигнал ємнісного елементу ЄЧЕ2 другого каналу,
 m_i – інерційна маса у кожному каналі.

Вихідні електричні сигнали u_1 та u_2 ємнісних елементів обох каналів сумуються у суматорі. Отже, додавши (8) та (9) матимемо:

$$u_\Sigma = u_1 + u_2 = 2kmg_z, \quad (10)$$

де u_Σ – вихідний сигнал підсилювача.

Тобто, з врахуванням (10) для двоканального ЄГ рівняння руху в умовах установки на Землі, буде:

$$kx = -2mg_z. \quad (11)$$

4.2. Рівняння руху ДЄГ в загальному випадку руху основи.

У роботі [22] ,було отримано рівняння руху для НК з одним гравіметром:

$$f_z = g_z - \frac{v^2}{r} + 2e \frac{v^2}{r} \left[1 - 2\cos^2\varphi * \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] - 2\omega_3 v * \sin k * \cos\varphi + + 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi - 2 \frac{\gamma_0 h}{r} - \omega_3^2 h \cos^2\varphi + \ddot{h} - \Delta_3, \quad (12)$$

де f_z – вихідний сигнал ДЄГ; g_z – ПСТ вздовж чутливої осі ДЄГ; v – швидкість БПЛА; r – радіус місцезнаходження БПЛА; e – стиск еліпсоїда; φ – географічна широта; k – курс БПЛА; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; h – висота БПЛА над еліпсоїдом; \dot{h} – вертикальна швидкість; \ddot{h} – вертикальне прискорення; γ_0 – довідкове ПСТ.

З усіх членів рівняння всі крім g_z завади. Перепишемо рівняння (12) через ПСТ:

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$g_z = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[1 - 2\cos^2\varphi * \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h} + \Delta_3 \quad (13)$$

Аномалія ПСТ дорівнює дельті ПСТ вздовж всієї осі чутливості ДЄГ. Тому рівня руху НК для визначення аномалії ПСТ, набуває вигляду:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[1 - 2\cos^2\varphi * \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \ddot{h} - \gamma_0 + \Delta_3 \quad (14)$$

Двохканальний ємнісний гравіметр у складі НК є і фільтром основного збурення і чутливим елементом. Тому рівняння руху НК із ДЄГ для визначення Δg буде мати вигляд:

$$\Delta g = f_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[1 - 2\cos^2\varphi * \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \gamma_0 + \Delta_3 \quad (15)$$

Оскільки в НК використано ДЄГ, котрий усуває вплив вертикального прискорення, то вертикальне прискорення \ddot{h} відсутнє у рівнянні (15). Вплив вертикального прискорення у 10^3 разів більший від корисного сигналу ПСТ.

Рівняння (15), можна переписати у більш простому вигляді:

$$\Delta g = f_z + E + A - \gamma_0 + \Delta_3 \quad (16)$$

де f_z – вихідний сигнал ДЄГ;

$$E = \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[1 - 2\cos^2\varphi * \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi - \text{поправка Етвеша};$$

$$A = 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \text{поправка висоти};$$

$\gamma_0 = \gamma_{0e}(1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi)$ – довідкове значення ПСТ прийняте на Генеральній Асамблеї Міжнародного Союзу у міжнародній гравіметричній системі IGSN71[7];

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\gamma_{0e} = 9,780318 \text{ м/с}^2$ – екваторіальне значення ПСТ;

$$\Delta_3 = K_{\epsilon\Gamma} \left(\frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} \right) - \text{похибка від впливу}$$

кутової швидкості обертання Землі, де λ – довгота; φ – широта; $\bar{\varphi}$ – середнє значення широти[7,23,24]

Розглянувши рівняння (16) можна зробити висновок, що НК складається із підсистем, кожна з яких виконує свою функцію: гравіметр вимірює ПСТ, ГСП стабілізують вісь чутливості ДЄГ у вертикальне положення, ІНС визначає координати місцезнаходження та швидкості, БК здійснює обчислювальні операції. Тому вираз 16 можна представити такою функціональною схемою (рис.4.2.)

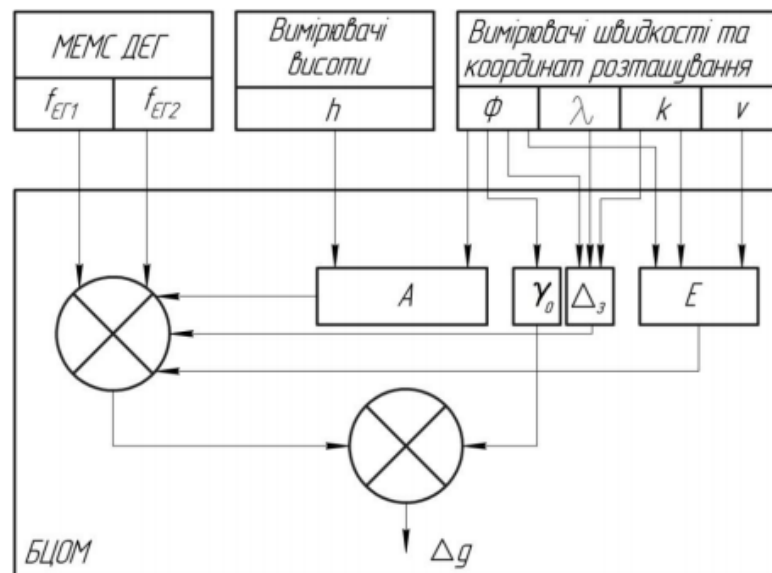


Рис.4.2. Функціональна схема автоматизованого НК із ДЄГ[7]

Якщо встановити ДЄГ на БПЛА повне рівняння руху НК з урахування (7) та (16) буде:

$$\begin{aligned} kx = & 2g_z + \frac{v^2}{r} \left\{ 1 - 2e * \left[1 - 2\cos^2 \varphi * \left(1 - \frac{\sin^2 k}{2} \right) \right] \right\} + 2\omega_3 v * \\ & * \sin k * \cos \varphi - 2\dot{h} \frac{e}{r} v * \cos k \sin 2\varphi + 2 \frac{\gamma_0 h}{r} + \omega_3^2 h \cos^2 \varphi - \\ & - \gamma_{0e} (1 + 0,0053024 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi) + \\ & + K_{\epsilon\Gamma} \left(\frac{k(t_2) - k(t_1)}{t_2 - t_1} + \omega_3 \sin \bar{\varphi} + \frac{\lambda(t_2) - \lambda(t_1)}{t_2 - t_1} \sin \bar{\varphi} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Перевагою двоканального ємнісного гравіметра від інших відомих гравіметрів є те, що він не вимірює вертикальне прискорення, яке є основною складовою похибки вимірювань.

4.3. Структурна схема ДЄГ

Як і будь який інший засіб вимірювальної техніки, двоканальний ємнісний гравіметр має одну величину на вхід, а іншу на вихід, а тому служить перетворювачем вхідного сигналу на вихідний. На відміну від одноканального ємнісного гравіметра, у ДЄГ усувається вплив найбільш сильних похибок, таких як: вплив вертикального прискорення БПЛА а також інструментальних.

Склавши структурну схему, можна визначити передатний коефіцієнт гравіметра $K_{\text{ЄГ}}$

На рис.4.3. зображено структурну схему одноканального ємнісного гравіметра.



Рис. 4.3. Структурна схема ЄГ

W_1 —перетворення у зміну відстані між обкладинками ПСТg, яке діє на ємнісний елемент. Ланка W_1 пропорційна силі земного тяжіння G , яка діє на масу ємнісного елемента (ЄЕ). Якщо сила тяжіння буде діяти перпендикулярно до площини рухомої обкладки, і відстань змінюватиметься рівномірно, тоді $G = 2F_{\text{пр}} = 2kx$, тоді:

$$W_1 = \frac{x}{G} = \frac{G}{2k} * \frac{1}{G} = \frac{1}{2k}; \quad (18)$$

W_2 — змін відстані між обкладинками перетворюється на зміну ємності C на електродах; W_3 — зміна ємності перетворюється у зміну напруги на електродах чутливого елемента; W_4 — описує процес, який проходить при зміні напруги на ємнісному елементі; $W_{\text{під}}$ — передатна хаактеристика

операційного підсилювача напруги.

На рис.4.4 зображено структурну схему двохканального ємнісного гравіметра.

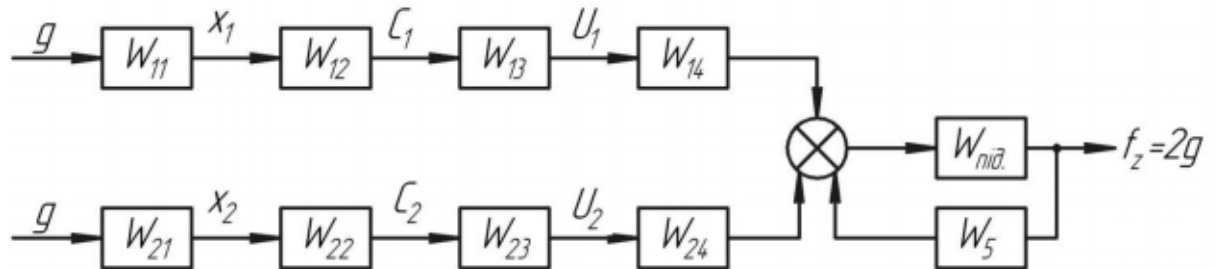


Рис. 4.4 Структурна схема ДЄГ

W_{11}, W_{21} – перетворення у зміну відстані між обкладинками x під дією ПСТ g , яке діє на ємнісний елемент; W_{12}, W_{22} – зміна відстані між обкладинками, яка перетворюється на зміну ємності C на електродах; W_{13}, W_{23} – зміна ємності, що перетворюється у зміну напруги на електродах чутливого елементу; W_{14}, W_{24} – описує процес, який проходить при зміні напруги на ємнісному елементі; $W_{\text{під}}$ – передатна характеристика операційного підсилювача напруги; W_5 – фільтрування зворотнім зв'язком.

Перетворення зміни відстані між обкладинками на зміну ємності C відповідає ланці W_2 :

$$W_2 = \frac{\Delta C}{x} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot x}{d \cdot x} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (19)$$

де d – відстань між обкладинками у стані спокою; ε – відносна діелектрична проникність матеріалу; ε_0 – діелектрична постійна вакууму; S – площа обкладинок конденсатора [7].

Перетворення зміни ємності ΔC у зміну напруги ΔU_{ey} на електродах чутливого елементу відповідає ланці W_3 :

$$W_3 = \frac{\Delta U_{\text{ey}}}{\Delta C} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot \Delta C}{C \cdot \Delta C} = \frac{U_{\text{вх}}}{C} \quad (20)$$

Процес, що проходить при зміні напруги на ємнісному елементі, тобто передача $\Delta U_{\text{ЄУ}}$ в коло $U_{\text{ВХ}}$ відповідає ланці W_4 . W_4 – передатна функція диференціюючої ланки. $R_{\text{ВХ}}$ – вхідний опір, що має підсилювач напруги. Передатна функція W_4 має вигляд:

$$W_4 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ЄУ}}} = \frac{1}{\varepsilon_R} \frac{1 + \tau p}{1 + \frac{\tau}{\varepsilon_R} p}, \quad (21)$$

де коефіцієнт $\varepsilon_R = \frac{R_{\text{ЄЄ}} + R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}}$, а постійна часу $\tau = R_{\text{ЄЄ}} * C_{\text{ЄЄ}}$.

Передатна характеристика операційного підсилювача напруги відповідає ланці $W_{\text{під}}$, яка виявляє властивості інерціальної ланки першого порядку:

$$W_{\text{під}} = \frac{K_{\text{ОП}}}{1 + p\tau_{\text{ОП}}}, \quad (22)$$

де $K_{\text{ОП}}$ – коефіцієнт підсилення, який має операційний підсилювач, $\tau_{\text{ОП}}$ – постійна часу.

Але, оскільки ємнісний гравіметр працює у вузькому діапазоні частот, то передатна характеристика може бути приблизно рівною коефіцієнту підсилення ОП, тому вважатимемо:

$$W_5 = K_{\text{ОП}}. \quad (23)$$

Тоді загальне передатне відношення буде мати вигляд[38]:

$$W = (W_{11} * W_{12} * W_{13} * W_{14} + W_{21} * W_{22} * W_{23} * W_{24}) \frac{W_{\text{під}}}{1 + W_{\text{під}} * W_5}. \quad (24)$$

4.4. Конструкція МЕМС ДЄГ

На сьогоднішній момент актуальна МЕМС конструкція, яка складається з нерухомої основи, що жорстко з'єднана з корпусом, та чутливого елемента, котрий прикріплений до верхньої рухомої обкладинки.

На рис. 4.5. зображено модифікацію наведеної вище конструкції. Покращення полягає у зустрічно-штирьовому розташуванні електродів

обкладинок. У ній маса кріпиться до кристалу за допомогою пружних підвісів. Рухомі електроди розташовані безпосередньо на масі, а нерухомі – праворуч та ліворуч від рухомих[7,25].

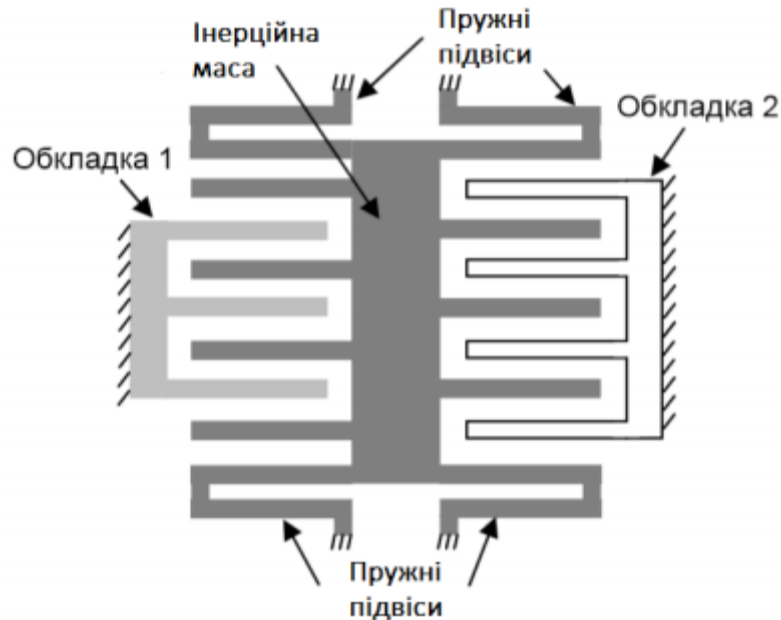


Рис. 4.5. Конструкція диференціального ємнісного MEMC – акселерометра[25]

Для отримання потужнішого вихідного сигналу, а також точніших показань у порівнянні з одноканальним ЄГ, використовують декілька однакових ємнісних перетворювачів на одній MEMC-пластині(рис. 4.6)[7,26].

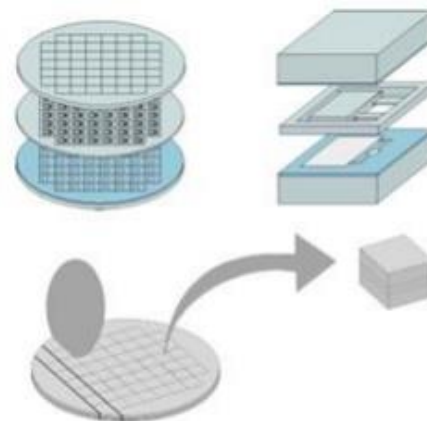


Рис. 4.6. Розміщення декількох MEMC ДЄГ на одній пластині[26]

Двоканальність системи реалізується за допомогою встановлення двох ідентичних симетричних МЕМС-пластин. Їх вихідні сигнали додаються у суматорі, а вже тоді передаються на обробку і підсилення. Саме двоканальність дозволяє понизити похибку від зовнішніх фізичних факторів, а також покращує лінійність вихідного сигналу[27]

На рис 4.7 зображено МЕМС ДЄГ[27].

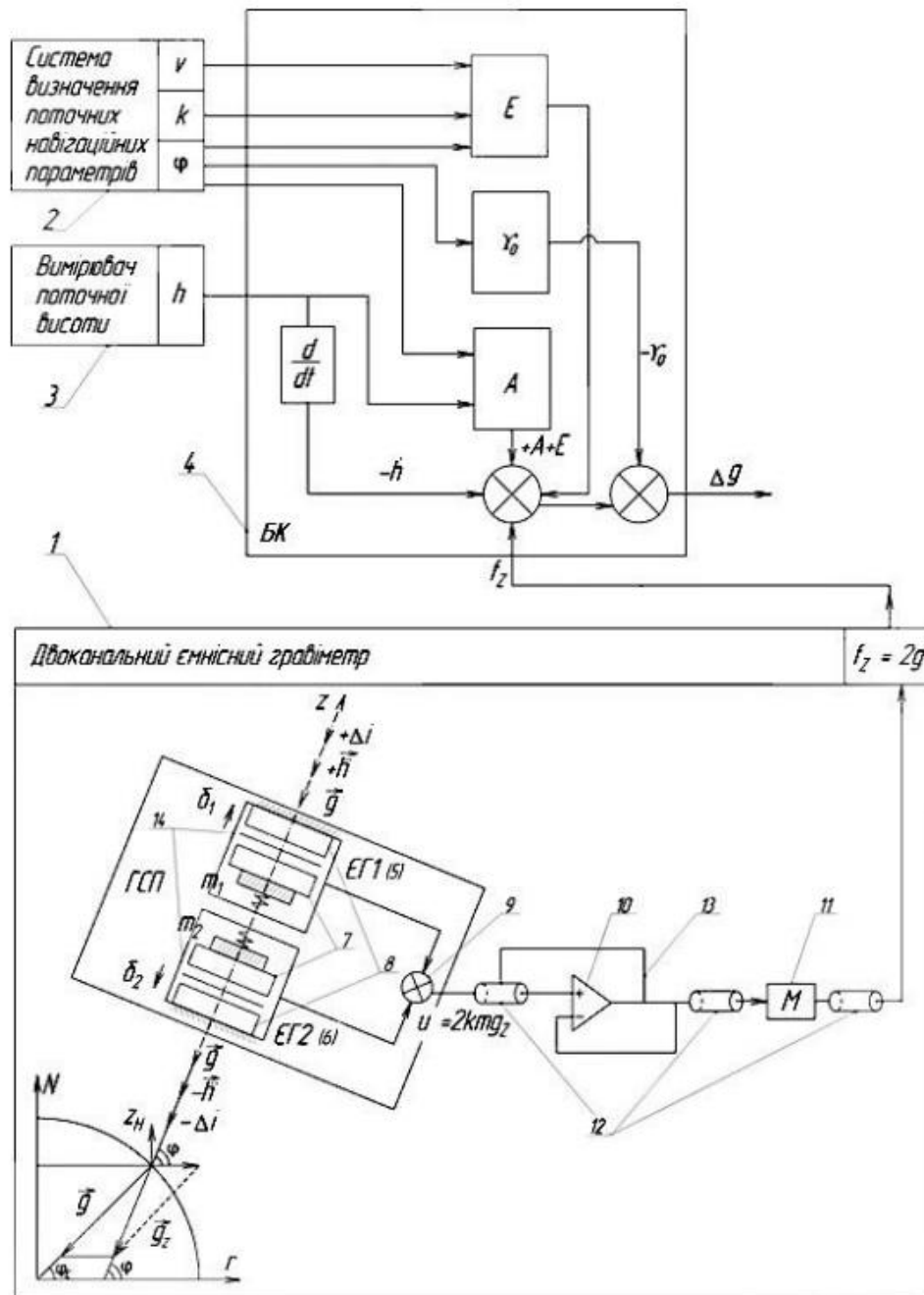


Рис. 4.7. МЕМС ДЄГ автоматизованого НК

1 – гравіметр, 2 – система визначення поточних навігаційних параметрів,

3 – вимірювач поточної висоти, 4 – блок керування, 5,6 – ємнісні елементи ЄГ1 та ЄГ2 відповідно, 7 – рухомі і 8 – нерухомі пластини, 9 – суматор, 10 – підсилювач, 11 – цифровий модуль, 12 – екрановані коаксіальні кабелі, 13 – захисне кільце, 14 – діелектрики.

4.5.Розрахунок основних параметрів МЕМС гравіметра

Власна частота коливань:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (25)$$

Де K – коефіцієнт пружності підвісу, m – маса.

Абсолютний і відносний коефіцієнти демпфування розраховуються за формулами[25]:

$$b = n\mu \frac{h^3 l}{d^3}, \quad (26)$$

$$\xi = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}, \quad (27)$$

де n – кількість пар зубів зустрічно-штирьового конденсатора, μ – в'язкість повітря, h –висота зуба, l – довжина зуба, d – відстань між пластинами[25].

Розрахункове значення величини напруги притягання, або напруги, при якій рухома обкладка починає притягатись до нерухомої розраховується за формулою[25]:

$$U_0 = \sqrt{\frac{8d^3 k}{27\varepsilon_0 S}}, \quad (28)$$

де S – площа обкладки, ε_0 – діелектрична проникність вакууму[25].

4.6.Склад та аналіз похибок МЕМС ДЄГ

Щоб проаналізувати похибки, які можливі у двоканального МЕМС гравіметра, розіб'ємо їх на таку класифікацію[28]:

- залежно від зумовлюючих чинників:
 - методичні, зумовлені недосконалістю методу вимірювання, або невірно підбраною моделлю об'єкта вимірювання;
 - інструментальні, зумовлені властивостями певного засобу вимірювання;
- залежно від характеру впливу:

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- статичні;
- динамічні;
- залежно від повторюваності:
 - випадкові, такі, що змінюються за знаком і величиною випадково при однакових вимірюваннях і однакових умовах;
 - систематичні, постійні похибки при певних вимірюваннях[29,30].

Інструментальні похибки одноканального МЕМС гравіметра визначаються[28,35]: порогом чутливості; порушення лінійності між вхідним та вихідним сигналами; гістерезисом у пружних елементах; температурною залежністю параметрів і характеристик гравіметра.

Формула перетворення ПСТg у напругу:

$$U_{\text{ВІХ}} = \frac{d_{ij} * m * g_z}{C_{\text{ЕЕ}}}, \quad (29)$$

де $U_{\text{ВІХ}}$ – вихідна напруга ДЄГ; g_z – ПСТ; d_{ij} – модуль; m – маса одноканального МЕМС ЄГ; $C_{\text{ЕЕ}}$ – електрична ємність МЕМС ЄГ.

ПСТ визначається за формулою:

$$g_z = \frac{U_{\text{ВІХ}} * C_{\text{ЕЕ}}}{d_{ij} * m}, \quad (30)$$

Відносна похибка вихідного сигналу дорівнює сумі відношень відносних похибок параметрів МЕМС ЄГ до показників ступенів цих параметрів[27]:

$$\frac{\Delta g_z}{g_z} = \frac{\Delta U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВІХ}}} + \frac{\Delta C_{\text{ЕЕ}}}{C_{\text{ЕЕ}}} - \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} - \frac{\Delta m}{m}, \quad (31)$$

Складові можна розписати як:

1. Похибка зміни модуля, матеріал ЧЕ – кремній. Зі зміною температури залежність модуля описується законом[31]:

$$\Delta d_{ij} = d_{ij} * \alpha_{\text{стр}} * \Delta t, \quad (32)$$

де $\alpha_{\text{стр}}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення, в нашому випадку, кремнію, Δt – зміна часу.

Відносна похибка зміни модуля:

$$\left(\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} \right) = \alpha_{\text{стр}} * \Delta t \quad (33)$$

Для кремнію $\alpha_{\text{стр}} = 0,59 * 10^{-6} \text{C}^{-1}$ [32], отже:

$$\left(\frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0,59 * 10^{-6} * 1 = 0,59 * 10^{-6}. \quad (34)$$

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Похибка зміни електричної ємності[31]:

$$C_{EE} = \frac{\varepsilon * S}{h_n}, \quad (35)$$

де ε – діелектрична проникність кремнію; S – площа одноканального МЕМС ЄГ; h_n – висота МЕМС ЄГ.

Похибка зміни діелектричної проникності:

$$\left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}\right) = 1 * 10^{-5}. \quad (36)$$

Відносна похибка зміни площі:

$$\left(\frac{\Delta S}{S}\right) = \frac{0,005 * 10^{-8}}{2,3 * 10^{-7}} + \frac{0,0015 * 10^{-8}}{2,3 * 10^{-7}} = 0,65 * 10^{-4}. \quad (37)$$

де $S = 2,3 * 10^{-7} \text{ м}^2$ – площа одноканального МЕМС ЄГ;

$\Delta S = 0,0015 * 10^{-8} \text{ м}^2$ – допуски на сторони площі МЕМС ЄГ.

Похибка зміни висоти МЕМС ЄГ при $\Delta h_n = 0,3 \text{ мкм}$ [31]:

$$\frac{\Delta h_n}{h_n} = \frac{0,3 * 10^{-6}}{5 * 10^{-3}} = 0,6 * 10^{-4}. \quad (38)$$

Сумарна похибка зміни електричної ємності дорівнює[27]:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta C_{EE}}{C_{EE}} &= \left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}\right) + \left(\frac{\Delta S}{S}\right) - \frac{\Delta h_n}{h_n} = 0,1 * 10^{-4} + 0,65 * 10^{-4} - \\ &- 0,6 * 10^{-4} = 0,15 * 10^{-4}. \end{aligned} \quad (39)$$

3. Похибка від зміни густини МЕМС ЄГ[31]:

$$m = \rho * V, \quad (40)$$

де ρ – густина кремнію; V – об'єм одноканального ЄГ.

Похибка від зміни густоти ЄГ[31]:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right) = \alpha_{\text{стр}} * \Delta t$$

де $\alpha_{\text{стр}} = 0,59 * 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ [32] – температурний коефіцієнт лінійного розширення, в нашому випадку, кремнію, Δt – зміна часу.

Відносна похибка зміни густини МЕМС ЄГ[31]:

$$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right) = 0,59 * 10^{-6} * 1 = 0,59 * 10^{-6}. \quad (41)$$

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Похибка від зміни об'єму МЕМС ЄГ[31]:

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right) = \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta h_n}{h_n} = 0,65 * 10^{-4} + 0,6 * 10^{-4} = 1,25 * 10^{-4} . \quad (42)$$

Похибка зміни маси:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta V}{V} = 0.59 * 10^{-6} + 1.25 * 10^{-4} = 1.84 * 10^{-4} (43)$$

4. Похибка зміни напруги МЕМС ЄГ, враховуючи, що максимальна інструментальна похибка, не перевищує 0,1мГал:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВІХ}}} &= \frac{\Delta g_z}{g_z} - \frac{\Delta C_{\text{ЄЄ}}}{C_{\text{ЄЄ}}} + \frac{\Delta d_{ij}}{d_{ij}} + \frac{\Delta m}{m} = \\ &= 0,01 * 10^{-4} - 0,15 * 10^{-4} + 0,0059 * 10^{-4} + 1,84 * 10^{-4} = 1,7 * 10^{-4}. \end{aligned} \quad (44)$$

Інструментальна похибка для двоканального МЕМС ЄГ[27,38]:

$$U_1 = k(mg_z + m\Delta\ddot{z} + \Delta i); \quad (45)$$

$$U_2 = k(mg_z - m\Delta\ddot{z} - \Delta i); \quad (46)$$

де U_1 – вихідний електричний сигнал першого каналу;

U_2 – вихідний електричний сигнал другого каналу;

m – вага інерційної маси у кожному з каналів;

k – електрична стала.[31]

Вихідний сигнал отримуємо після суми U_1 та U_2 , в результаті зникають похибки спричинені впливом вертикального прискорення $\Delta\ddot{h}$ та інструментальні Δi . Отже, похибка двоканального МЕМС ЄГ буде на порядок нижчою ніж у одноканального[27].

4.7Висновки до четвертого розділу

В даному розділі було отримано математичну модель МЕМС ДЄГ, складено структурну схему, та знайдено загальну передаточну функцію. Проведено аналіз похибок, розраховано інструментальні похибки для одноканального МЕМС ЄГ та доведено майже практичну відсутність інструментальних похибок у двоканальному МЕМС гравіметру.

РОЗДІЛ 5

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО

До складу БПЛА входить автоматизована система стабілізації.

Автоматизована система стабілізації (СС) зображена на рис. 5.1.[7] На СС встановлюється чутливий елемент: двоканальний ємнісний гравіметр.

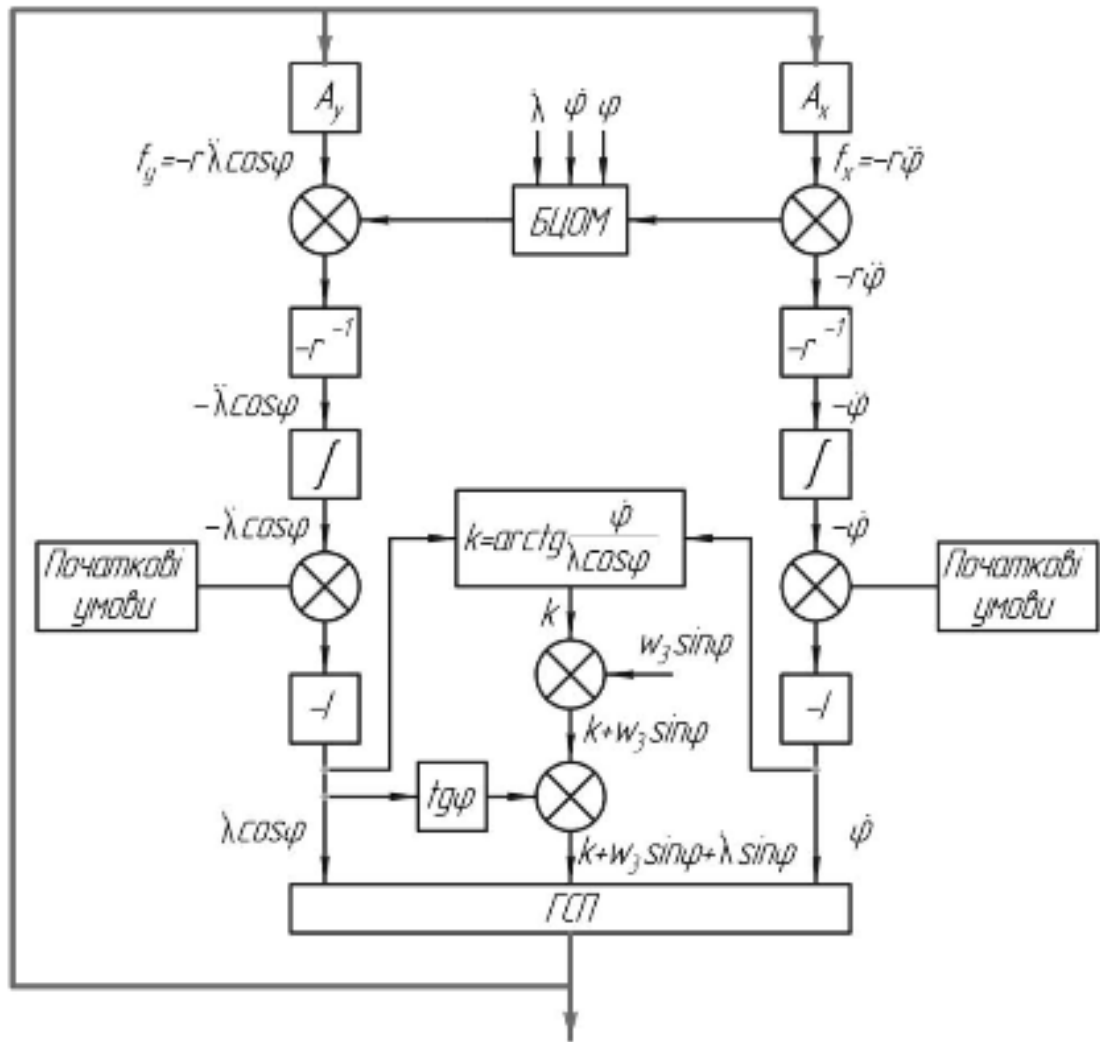


Рис. 5.1. Структурна схема системи стабілізації

Система стабілізації НК БПЛА забезпечує збіг вимірювальної осі ДЄГ із довідковою вертикаллю. ДЄГ встановлюється на горизонтальну стабілізовану платформу, яка складається з двохлінійних акселерометрів та спеціальних двигунів[7]. ГСП орієнтована у географічній системі координат.

Осі чутливості акселерометрі спрямовані на північ та на схід. Їх вихідні сигнали f_y , f_x матимуть вигляд [8]:

$$f_x = -(2\dot{r}\dot{\varphi}_c + r\ddot{\varphi}_c) \cos \chi + (\ddot{r} - r\dot{\varphi}_c^2) \sin \chi - 2r\omega_3\dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi - r\dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi + \aleph g; \quad (47)$$

$$f_y = 2r\dot{\varphi}_3\omega_3 \sin \varphi_c + 2r\varphi_c\dot{\lambda} \sin \varphi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda} \cos \varphi_c - r\ddot{\lambda} \cos \varphi_c - 2\dot{r}\omega_3 \cos \varphi_c - \nu g, \quad (48)$$

де \aleph – кут між нормаллями до еліпсоїда у меридіональному перерізі та у площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана; ν – кут між нормаллями до геоїда у меридіональному перерізі та у площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана; φ – географічна широта; φ_c – геоцентрична широта; χ – відхилення від вертикалі; λ – довгота місця.

Отримані сигнали надходять до блоку керування (БК), де формується керуючі сигнали для двигунів. Вони виставляють ГСП у нульове положення.

Якщо ГСП виставлена абсолютно точно у положення вертикалі, то горизонтальні компоненти ПСТ дорівнюють нулю. Тоді, враховуючи $\aleph g = -\nu g = 0$, БК буде компенсувати такі складові:

$$f_x \Rightarrow 0 = 2r\omega_3\dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi - r\dot{\lambda} \cos \varphi_c \sin \varphi; \quad (49)$$

$$f_y \Rightarrow 0 = 2r\dot{\varphi}_3\omega_3 \sin \varphi_c + 2r\varphi_c\dot{\lambda} \sin \varphi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda} \cos \varphi_c - 2\dot{r}\omega_3 \cos \varphi_c. \quad (50)$$

Нехтуючи складовими другого порядку та прийнявши відхилення від вертикалі рівним нулю, будемо мати:

$$f_x = -r\ddot{\varphi}_c; \quad (51)$$

$$f_y = -2r\ddot{\lambda} \cos \varphi_c. \quad (52)$$

Після проведення певних математичних операцій (множення на r^{-1} ,

інтегрування і зміни знаку) над сигналами f_y і f_x , на виході відповідних каналів отримаємо $\dot{\varphi}$ та $\dot{\lambda} \cos \varphi$ (рис. 1). Сигнал $\dot{\varphi}$ використовується для керування ГСП відносно осі, спрямованої на північ (x), а сигнал $\dot{\lambda} \cos \varphi$ - для керування відносно осі, спрямованої на схід (y)[7].

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 6

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЄГ

6.1. Опис експериментальної установки

Для проведення експерименту, було створено експериментальну установку, принципова схема зображена на рис 6.1. До складу установки входять: генератор механічних коливань (вібростенд) із вбудованими двома індукційними перетворювачами в механічний електричного сигналу; ДЄГ, розташований на вібростенді; мікросистема збору даних; блок підсилювача вихідного сигналу; генератор змінної напруги; комп'ютер[33,35].

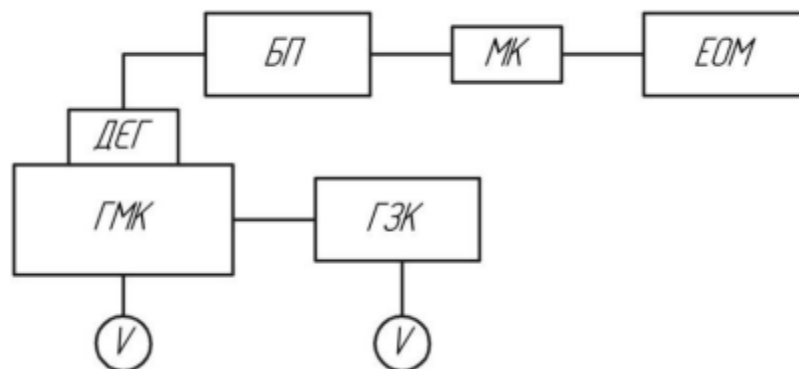


Рис.6.1. Принципова схема експериментальної установки ДЄГ[7,33,35] де, ГМК – генератор механічних коливань; ДЄГ – двоканальний ємнісний гравіметр; БП – блок підсилення; МК – мікросистема збирання даних; ГЗК – генератор змінної напруги живлення; М – вольтметр для реєстрації напруги[7,33].

6.1.1 Досліджуваний ДЄГ

В якості МЕМС ДЄГ використано два ідентичних ємнісних МЕМС акселерометри MMA8452Q[7].

6.2. Градувальна характеристика ДЄГ

Операція, при якій засіб вимірювання або вимірювальний прилад забезпечуються градувальною шкалою або таблицею називається градуванням[8]. Для градування було використано установку(рис.6.2.)

7	60	490558,552	490559,269	0,717
8	70	335563,193	335562,303	0,89
9	80	17366,047	17365,142	0,905
10	90	0	0	0,001

Порівнявши отримні результати з аналітичними розрахунками, можна побудувати графік залежності вихідного сигналу g_z від кута повороту α_z (рис 6.3).

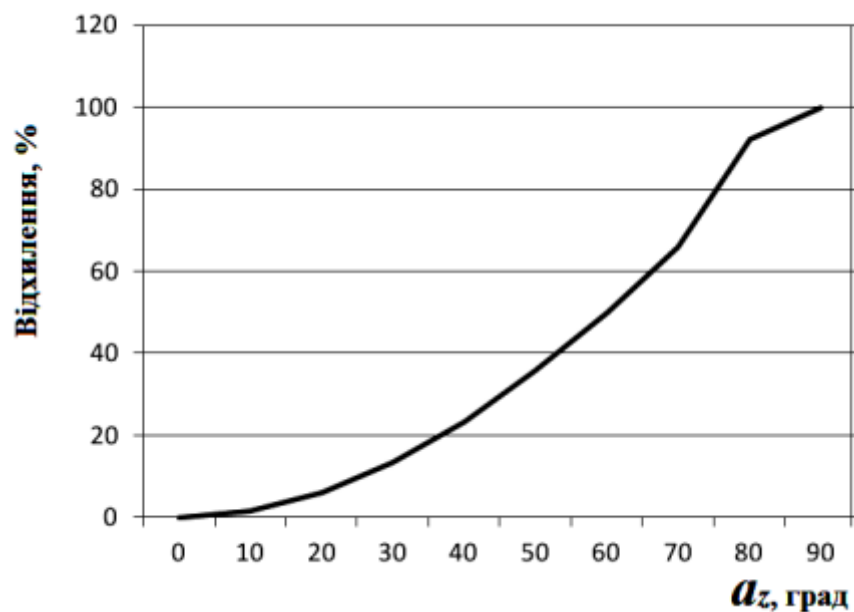


Рис.6.3. Графік залежності відхилення вимірювальної осі від поточного значення прискорення сили тяжіння

Як видно із таблиці 6.1 різниця між експериментальними та теоретичними значеннями не перевищує 0,5 мГал. Кут нахилу вимірювальної осі відносно довідкової вертикалі прямо пропорційно впливає на вихідні дані ДЄГ та його похибку. Тому забезпечення точного збігу вимірювальної осі ДЄГ НК із довідковою вертикаллю, запропоновано використання системи стабілізації, яка забезпечує точність у 0,5-15 кут.хв.

6.3. Визначення базових параметрів роботи макету

Установка розташована у КПІ ім. Ігоря Сікорського, GPS координати якого: широта: 50.449052° , довгота: 30.461085° .

Згідно з [34], зацими координатами

$$\gamma_0 = \gamma_{0e} (1 + 0.0052884 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi),$$

Знаходимо довідкове значення прискорення сили тяжіння $\gamma_{КПІ}$:

$$\gamma_{КПІ} = 9.78049(1 + 0.0052884 \sin^2 (50.449052) - 0.0000059 \sin^2 (2 \cdot 50.449052)) = 9.81118539 \text{ м/с}^2. \quad (53)$$

6.4. Проведення експерименту

Дані фіксувались та оброблювались на комп'ютері. Через кожні приблизно 10с проводилась автоматична обробка на комп'ютері.

Для кожного випадку розраховано систематичну похибку Δ_g :

$$\Delta_g = \left| \overline{g_{експ}}(t) - \gamma_{КПІ} \right|, \quad (54)$$

де, $\overline{g_{експ}}(t)$ – середнє значення вихідного сигналу ДЄГ отримане у ході експерименту за період спостереження у 10 с:

$$\overline{g_{експ}}(t) = \frac{1}{N_{експ} + 1} \sum_{i=0}^{N_{експ}} g(t_i), \quad (55)$$

де, $N_{експ}$ – кількість вимірів за 50 с; $g(t_i)$ – і-те значення вихідного сигналу ПГ.

Абсолютна похибка експериментальних вимірювань $\Delta_{g_{експ}}$:

$$\Delta_{g_{експ}} = \frac{\sigma_{\overline{g_{експ}}}}{\sqrt{N_{експ}}} t_p; \quad (56)$$
$$\sigma_{\overline{g_{експ}}} = \sqrt{\frac{1}{N_{експ}} \sum_{i=0}^{N_{експ}} [\overline{g(t_i)} - \overline{g_{експ}}]^2};$$

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$t_p = qt(p, d),$$

де, $\overline{\sigma_{g_{експ}}}$ – середньоквадратичне відхилення $\overline{g_{експ}(t)}$; $t_p = qt(p, d)$ – коефіцієнт оберненого розподілу Стюдента за довірчою імовірністю P та числом ступенів свободи $d = N_{експ}$.

Таблиця 6.2.

Похибки ДЄГ, зумовлені вібраціями основи

ω , рад/с	$\overline{g_{експ}(t)}$, мГал	$\Delta_{g_{експ}}$, мГал	Δ_g , мГал
0	981118,5401	0.001146	0.00006005
0.5	981121,4586	0.006187	2.91861146
1.0	981121,5938	0.048073	3.05382631
5.0	981123,9361	0.581024	5.39613122
10.0	981127,1002	0.850995	8.89864624
30.0	981131,6111	2.764097	13.0710667

З табл. 6.2. було визначено, що вихідний сигнал ДЄГ при нульових установках вібростенду становить $\Delta_g = 0.00006$ мГал і співпадає з довідковими значеннями ПСТ; для поступальних вібрацій до 10 рад/с, ДЄГ має точність у $\Delta_{g_{експ}} = 0,5$ мГал.

Відповідно з [8,34] та результатами моделювання, резонансний режим може виникати на частотах: $\omega_0 = 0.033; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3$ рад/с. Результати розрахунку похибок ДЄГ, зумовлені резонансними режимами роботи ДЄГ наведені у табл. 6.3. Навіть при резонансних ркжимах точність забезпечується на рівні $\Delta_{g_{експ}} = 0,5$ мГал.

Таблиця 6.3

Похибки ДЄГ, зумовлені резонансними режимами роботи

ω , рад/с	$\overline{g_{експ}(t)}$, мГал	$\Delta_{g_{експ}}$, мГал	Δ_g , мГал
0	981118,5401	0.001146	0.000060

0.033	981118,6686	0.198113	0.126386
0.05	981118,7438	0.369125	0.204863
0.1	981119,3439	0.542486	0.485573
0.2	981119,7601	0.412643	0.320256
0.3	981120,6526	0.3753374	0.210509

6.5.Результати дослідження МЕМС ДЄГ

Як видно із даних, наведених в табл.6.3, експериментальні дослідження співпадають із теоретичними розрахунками(рис.6.4.). Покази максимально схожі, що пояснюється неідеальністю обладнання для використаного для випробувань. Як видно з графіків, найгіршою частотою є 0,1 рад/с, адже похибка набуває свого максимального значення, але вона не перевищує задану точність в межах 0,5 мГал.

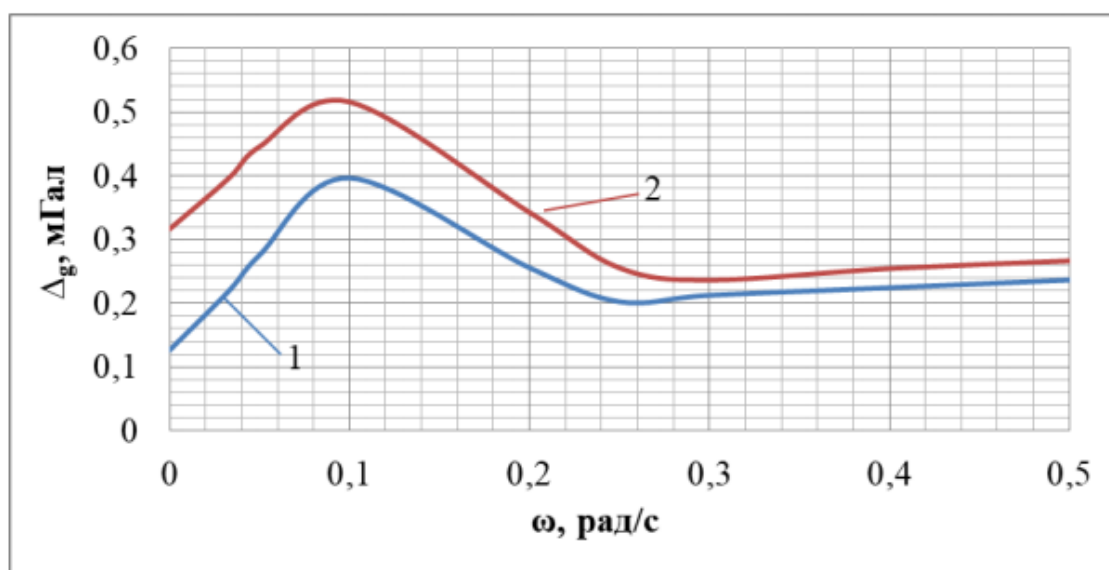


Рис.6.4 Результати цифрового моделювання та експерименту: 1 – цифрове моделювання; 2 – експеримент.

6.6 Визначення метрологічних характеристик

За відсутності вібрацій, ДЄГ може функціонувати, як наземний гравіметр. Теоретична та експериментальна похибка ДЄГ при відсутності

збурень складає 0,00006 мГал. Отже статична характеристика ДЄГ, як наземного гравіметра, складе:

$$\bar{g}_{\text{ДЄГ}} = \bar{g}_{\text{експ}} \pm 6 * 10^{-5} \text{ мГал.} \quad (57)$$

За наявності динамічних збурень, ДЄГ може функціонувати як гравіметр НК із точністю:

$$\bar{g}_{\text{ДЄГНК}} = \bar{g}_{\text{експ}} \pm 0,5 \text{ мГал.} \quad (58)$$

Відносна похибка ДЄГ НК:

$$\delta_g = \frac{\Delta g}{\bar{g}_{\text{експ}}} * 100\% = \frac{0.5}{981100.37556} * 100\% = 5.09 * 10^{-5}\% \quad (59)$$

Другий метод визначення параметрів ЧЕ

Дослідження проводиться на установці, що складається з: генератора механічних коливань 1, підсилювача 3 змінного струму, трьох вольтметрів 4, осцилографа 5, генератора змінної напруги 6. ДЄГ 2 розташований безпосередньо на стенді (рис.6.5) [35,36].

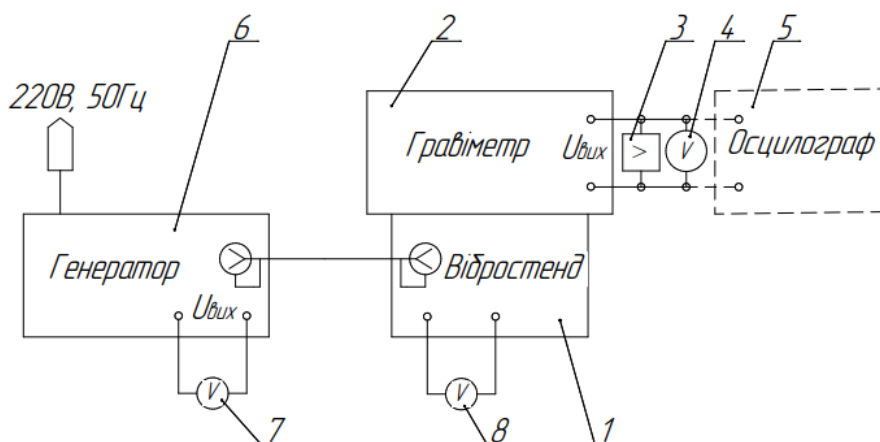


Рис.6.5. Принципова схема установки експериментальних досліджень ДЄГ [35,36]

де, 1 – генератор механічних коливань, 2 – ДЄГ, 3 – підсилювач, 4 – вольтметр, 5 – осцилограф, 6 – генератор змінної напруги, 7 – вольтметр реєстрації напруги живлення, 8 – вольтметр реєстрації напруги індукційного перетворювача.

Методика дослідження

1. Провести дослідження залежності амплітуди вихідного сигналу, який знімається з ДЄГ $U_{\text{ДЕГ}}$, та напруги індукційного перетворювача $U_{\text{ВП}}$, від частоти коливань вібростенда, для вхідної напруги генератора $U_{\text{ген}} = 5\text{В}$.
2. Провести дослідження залежності амплітуди вихідного сигналу, який знімається з ДЄГ $U_{\text{ДЕГ}}$, та напруги індукційного перетворювача $U_{\text{ВП}}$, від частоти коливань вібростенда, для вхідної напруги генератора $U_{\text{ген}} = 7\text{В}$.
3. Провести дослідження залежності амплітуди вихідного сигналу, який знімається з ДЄГ $U_{\text{ДЕГ}}$, та напруги індукційного перетворювача $U_{\text{ВП}}$, від частоти коливань вібростенда, для вхідної напруги генератора $U_{\text{ген}} = 8\text{В}$.
4. Провести дослідження амплітуди напруги з індукційного перетворювача $U_{\text{ВП}}$ від амплітудного значення напруги генератора $U_{\text{ген}}$ для однакових значень частоти f коливань вібростенда.
5. Провести дослідження залежності амплітуди вихідного сигналу з ДГ, що контролюється вольтметром 4, від частоти резонансів вимірювальної системи $f_{\text{рез}}$, Гц, які задаються генератором, для $U_{\text{ген}} = 5\text{В}$; $U_{\text{ген}} = 7\text{В}$; $U_{\text{ген}} = 8\text{В}$.

6.7. Висновки до шостого розділу

Розроблено лабораторну установку, та проведено експериментальне дослідження ДЄГ.

Побудовано градувальну характеристику ДЄГ НК та досліджено, що кут нахилу вимірювальної осі ДЄГ НК відносно довідкової вертикалі, прямопропорційно впливає на вихідні характеристики та величину похибки.

Експериментально встановлено похибку ДЄГ на поверхні Землі.

Експериментально встановлено, що навіть при резонансних умовах, $\omega_0 = 0.033; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3$ рад/с ДЄГ має похибку меншу за 0,5 мГал.

Експериментально визначено, що найбільша похибка ДЄГ виникає при частоті $\omega_0 = 0.1$ рад/с, і не впливає на точність вимірювань.

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 7

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

7.1 Вступ до технологічного розділу

Метою технологічного розділу є обґрунтування проектування і виготовлення ємнісного ЧЕ, що має переваги в порівнянні з аналогами.

Необхідно провести аналіз об'єкта для технічного завдання, оцінку рівня технологічної складальної одиниці, розрахунок точності збірки і визначення фізичної взаємозамінності, розробку технологічного процесу збірки, проектування й опис конструкції і принципу роботи контрольного пристосування.

Об'єктом для виконання технологічного розділу виберемо вузол підвісу інерційної маси. Складальна одиниця розрахована в попередніх розділах проєкту і складальне креслення приведенне в графічній частині проєкту.

Необхідно, щоб для складальних одиниць забезпечувалася простота збірки всіх деталей і складальних одиниць без пригонки і доробки, без селективного припасування, забезпечувана економічно прийнятними допусками в розмірних, кінематичних і електричних ланцюгах; можливість рівнобіжної збірки, що скорочує виробничий цикл; можливість найбільшої диференціації збірки.

Для усіх виробів при відпрацюванні конструкції на технологічність ставляться наступні задачі: зниження трудомісткості виготовлення; застосування стандартних складових частин; використання уніфікованих складових елементів; використання уніфікованих елементів конструкції деталей; можливість застосування типових технологічних процесів.

Усі показники технологічності класифікуються по наступним ознакам: об'єкту й області застосування; кількості ознак технологічності; області аналізу; способу вираження; значимості; систем оцінки.

Показники по об'єкту і області пристосування діляться на виробничі і експлуатаційні. Показники по кількості ознак технологічності діляться на

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

часткові, які характеризують тільки один признак технологічності конструкції виробу та на комплексні, які характеризують два чи більше ознак технологічності. Показники по області аналізу підрозділяються на технічні і техніко-економічні. По способу вираження показники бувають абсолютні та відносні. Показники по важливості діляться на основні і додаткові. По системі оцінки показники технологічності діляться на базові і показники розробляємої конструкції.

7.2 Визначення основних показників технологічності

Абсолютний техніко-економічний показник трудомісткості виготовлення $T_{\text{и}}$ виражається сумою нормо-годин, витрачених на виготовлення виробу

$$T_{\text{и}} = \sum T_i, \quad (60)$$

де T_i – трудомісткість виготовлення і випробувань i -й складовою частини виробу в нормо-годинах.

Рівень технологічності конструкції по трудомісткості виготовлення $K_{\text{у.т}}$ визначається як відношення досягнутої трудомісткості виробу $T_{\text{и}}=40$ н-г до базового показника трудомісткості виготовлення $T_{\text{б.и}}=44,4$ н-г :

$$K_{\text{у.т}} = T_{\text{и}} / T_{\text{б.и}} = 0,9. \quad (61)$$

Попередній розрахунок $K_{\text{у.т}}$ у процесі проектування виробу можна робити по наближеним розрахункам трудомісткості виготовлення основних складових частин, використовуючи дослідно-статистичні дані по виробках-представниках і коригувальні коефіцієнти.

Технологічна собівартість виробу $C_{\text{т}}$ визначається як сума витрат на одиницю виробу:

$$C_{\text{т}} = C_{\text{м}} + C_{\text{з}} + C_{\text{ц.р}} = 670 \text{ грн}, \quad (62)$$

де $C_{\text{м}} = 400$ грн – вартість матеріалів, витрачених на виготовлення виробу; $C_{\text{з}} = 200$ грн – заробітна платня виробничих робітників з

нарахуваннями; $C_{ц.р} = 70$ грн – цехові витрати, що включають у себе витрати на електроенергію, споживану устаткуванням, на ремонт і амортизацію устаткування, інструмента і пристосувань, на мастильні, охолоджуючі, обтиральні та інші матеріали, передбачені процесом виробництва виробу.

Рівень технологічності конструкції по технологічній собівартості визначається як відношення досягнутої собівартості виробу C_T до технологічної собівартості базового виробу $C_{б.т} = 700$ грн

$$K_{y.c} = C_T / C_{б.т} = 0,95. \quad (63)$$

Попередній розрахунок $K_{y.c}$ у процесі проектування виробу можна робити по наближених розрахункам технологічної собівартості основних складових частин, використовуючи дослідно-статистичні дані по виробках-представниках і коригувальні коефіцієнти.

7.3 Визначення додаткових показників технологічності

7.3.1 Технічні показники уніфікації конструкції

Коефіцієнт уніфікації виробу:

$$K_y = \frac{N_y + n_y}{N + n}, \quad (64)$$

де $N_y = 1$ – кількість уніфікованих складальних одиниць; $n_y = 3$ – кількість уніфікованих деталей; $N = 3$ – кількість усіх складальних одиниць; $n = 19$ – кількість усіх деталей

Згідно з формулою (64) одержуємо

$$K_y = (1+3)/(3+19) = 0,18.$$

Коефіцієнт уніфікації складальних одиниць $K_{y.cб}$ визначається як відношення кількості уніфікованих складальних одиниць до їхнього загального числа:

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_{y\delta} = \frac{N_y}{N} = \frac{1}{3}. \quad (65)$$

Коефіцієнт уніфікації деталей $K_{y\delta}$

$$K_{y\delta} = \frac{n_y}{n} = \frac{3}{19} = 0,16. \quad (66)$$

Коефіцієнт уніфікації деталей $K_{3\delta}$ враховує ступінь розчленованості всієї конструкції виробу на складальні одиниці і деталі і визначається як

$$K_{3\delta} = \frac{N}{N + n} = \frac{3}{3 + 19} = 0,14. \quad (67)$$

7.4 Визначення комплексного показника технологічності виробу

Комплексні показники технологічності конструкції на відміну від часткових характеризують не окремі часткові ознаки технологічності, а визначену групу ознак технологічності конструкції виробу.

Технологічність конструкції виробу може характеризуватися одним комплексним показником чи декількома, що узагальнюють групи часткових показників чи виражають різні види технологічності конструкції виробу.

Методика визначення комплексних показників враховує різну економічну ефективність вхідних часткових показників шляхом введення коефіцієнтів економічної ефективності K_e часткових показників технологічності конструкції виробу. Цей коефіцієнт доцільно обмежувати межами $0 < K_e \leq 1$.

Технологічність конструкції виробу оцінюється основними та допоміжними показниками з урахуванням коефіцієнтів економічної ефективності K_e . Коефіцієнт економічної ефективності визначаються з умов:

$$\sum_{i=1}^n K_{ei} = 1. \quad (68)$$

Комплексний показник технологічності розраховується за формулою:

$$K_k = \frac{K_1 \cdot K_{1e} + K_2 \cdot K_{2e} + K_3 \cdot K_{3e} + \dots + K_n K_{ne}}{K_{1e} + K_{2e} + K_{3e} + \dots + K_{ne}}, \quad (69)$$

де $K_1 = K_{yt} = 0,9$; $K_2 = K_{yc} = 0,95$; $K_3 = K_y = 0,18$;

$K_4 = K_{yc6} = 1/3$; $K_4 = K_{уд} = 0,16$; $K_5 = K_{з6} = 0,14$;

$$K_k = \frac{0,9 \cdot 0,2 + 0,95 \cdot 0,2 + 0,18 \cdot 0,2 + 1/3 \cdot 0,2 + 0,16 \cdot 0,1 + 0,14 \cdot 0,1}{0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,1 + 0,1} = 0,502.$$

Фізичний зміст коефіцієнта економічної ефективності полягає в тому, що він забезпечує при зміні значень порівнювальних часткових показників в одне й те саме число раз однаковий вплив на економічні показники.

Значення комплексного показника, вираженого у відсотках, наочно показує ступінь відпрацювання на технологічність конструкції виробу.

7.5 Розрахунок розмірної ланки двома методами

Виберемо зазор на кресленні для визначення замикаючої ланки (рис. 7.1).

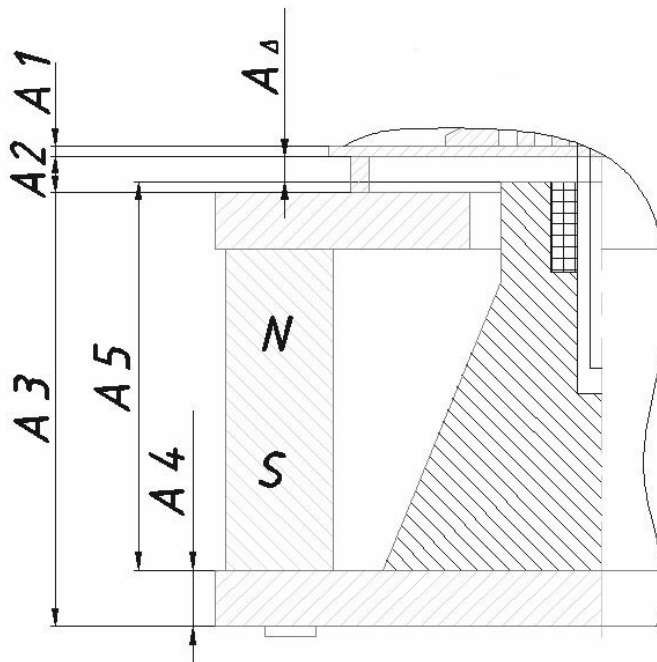


Рис. 7.1 - Креслення розмірної ланки

Номінальний розмір замикаючої ланки дорівнює

$$A_{\text{зам}} = (A_2 + A_3) - (A_1 + A_4 + A_5) = (7 + 110) - (3 + 15 + 98) = 1 \text{ мм};$$

Накреслимо схему розмірного ланцюга:

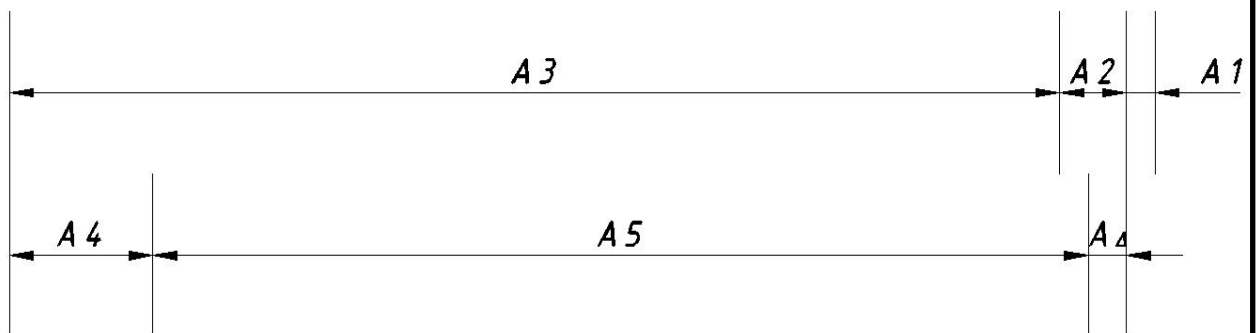


Рис. 7.2 – Схема розмірного ланцюга

Занесемо значення розмірів розмірного ланцюга до таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Номінальні значення складових частин розмірної ланки

Ланки, що збільшуються			Ланки, що зменшуються		
A_i	δ_i	ΔK_i	A_j	δ_j	ΔK_j
$A_2=7$	$\pm 0,05$	0	$A_1=3$	- 0,01	- 0,005
			$A_4=15$	- 0,02	- 0,01
$A_3=110$	$\pm 0,05$	0	$A_5=98$	- 0,1	- -0,05

За ГОСТ 16319–80 розрізняють пряму та зворотну задачі розрахунку розмірних ланцюгів. У даному проекті розв’язуємо зворотну задачу двома методами:

1) Координатний метод.

Номінальне значення замикаючої ланки ланцюга

$$A_3 = \sum_{i=1}^{зб} A_i - \sum_{j=1}^{зм} A_j \quad (70)$$

де $\sum_{i=1}^{зб} A_i$ – сума розмірів ланок, які збільшують ланцюг;

$\sum_{i=1}^{зм} A_i$ – сума розмірів ланок, які зменшують ланцюг.

$$A_3 = (A_2 + A_3) - (A_1 + A_4 + A_5) = (7 + 110) - (3 + 15 + 98) = 1 \text{ мм.}$$

Допуск замикаючої ланки дорівнює сумі абсолютних величин ланок:

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^5 |\delta_i|, \quad (71)$$

$$\delta_{\Delta} = 0,05 + 0,05 + 0,05 + 0,05 + 0,01 + 0,02 + 0,1 = 0,33 \text{ мм.}$$

Координата середини поля допуску замикаючої ланки:

$$K_3 = \sum_{i=1}^2 K_i - \sum_{i=1}^3 K_i = 0 - (-0,005 - 0,01 - 0,05) = 0,065 \text{ мм} \quad (72)$$

Верхнє і нижнє відхилення розміру замикаючої ланки:

$$\begin{aligned} \delta_{\Delta B} &= K_3 + 0,5\delta_{\Delta} = 0,065 + 0,5 \cdot 0,33 = 0,23, \\ \delta_{\Delta H} &= K_3 - 0,5\delta_{\Delta} = 0,065 - 0,5 \cdot 0,33 = -0,1. \end{aligned} \quad (73)$$

Відповідь: $1_{-0,1}^{+0,23}$ (мм).

2) Метод екстремальний безномінальний

Цей метод найпростіший і рекомендується виробництву. У разі застосування методу визначають $(BB)_{зам}$ і $(HB)_{зам}$:

$$\begin{aligned} (BB)_{зам} &= \sum_{i=1}^n (BB_i)_{зб} - \sum_{j=1}^p (HB_j)_{зм} \\ (HB)_{зам} &= \sum_{i=1}^n (HB_i)_{зб} - \sum_{j=1}^p (BB_j)_{зм} \end{aligned} \quad (74)$$

,де (BB) , (HB) – верхнє і нижнє відхилення допусків складових ланок, які взято зі своїми знаками. Очевидно, що даний метод найбільш технологічний і простий у застосуванні.

$$(BB)_{зам} = (0,05 + 0,05) - (-0,01 - 0,02 - 0,1) = 0,23$$

$$(HB)_{зам} = (-0,05 - 0,05) - (0) = -0,1.$$

Відповідь: $1_{-0,1}^{+0,23}$ (мм).

Результати розрахунків по обох методах однакові.

7.6 Розробка технологічного процесу складання

7.6.1 Розробка схеми складального складу

На основі аналізу конструкторської документації розробляється схема складального складу. Побудова таких схем дає можливість визначити конструктивні і складальні елементи виробу та їх взаємозв'язок. На рис. 7.3

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[illegible]

7.6.2 Розробка технологічної схеми складання

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

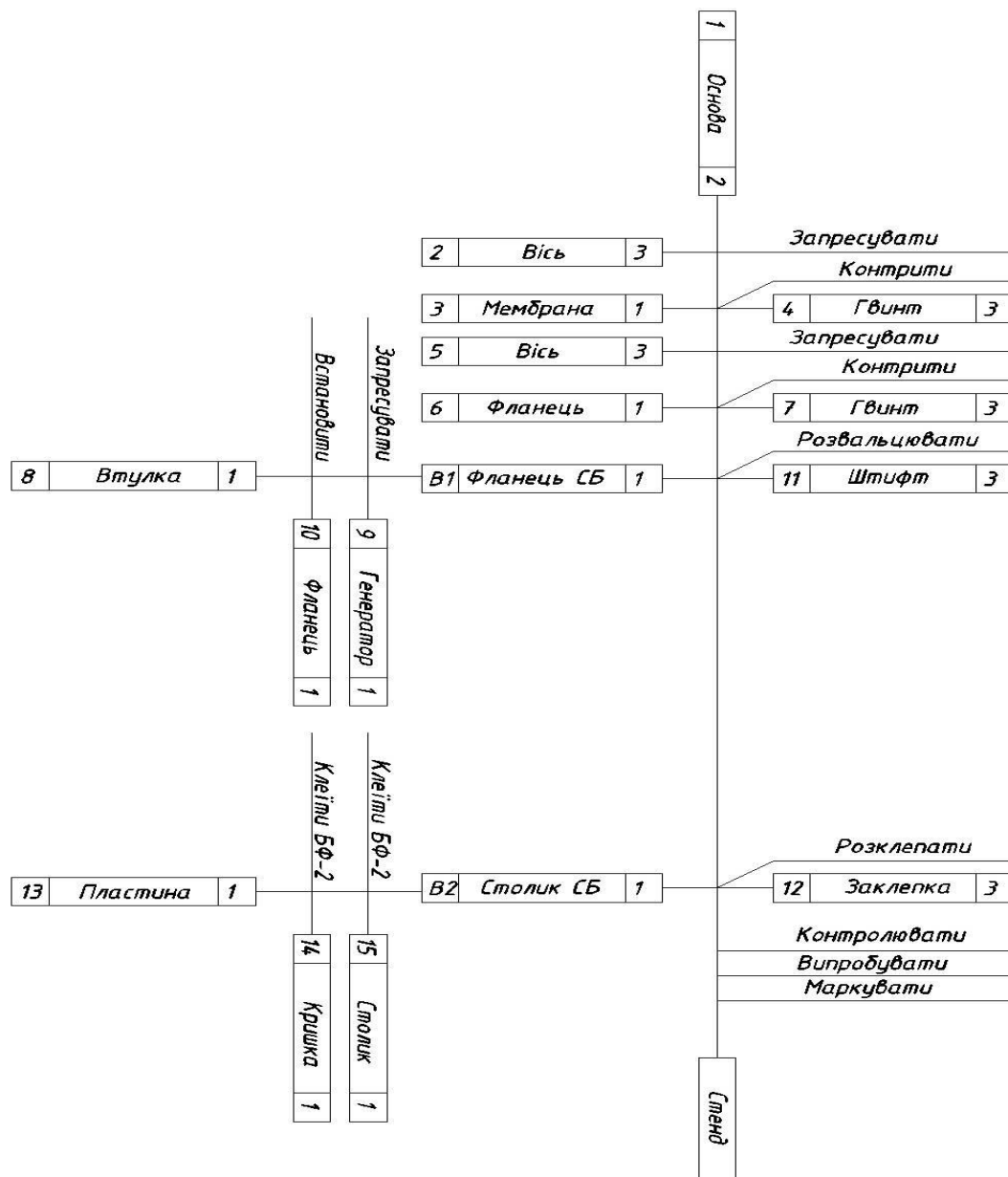


Рисунок 7.4 - Технологічна схема складання

7.7 Висновки до технологічного розділу

У технологічній частині дипломної роботи:

- визначена технологічність конструкції;
- розроблені схема складального складу і технологічна схема збірки;
- спроектовано технологічний процес складання;
- розраховано точність збірки;
- спроектовано технологічне пристосування для випробування ЧЕ та вимірювання прискорення.

Висновок

У даній дипломній роботі було розглянуто двоканалний МЕМС ЄГ чутливий елемент такої важливої системи, як система стабілізації безпілотного літального апарату. Розпочато було з пошуку та огляду патентних даних по відомих типах гравіметрів, в результаті визначено, що наявні у відкритому доступі гравіметри не мають достатньої точності, щоб установлюватись на автоматизованих навігаційних комплексах. Не зважаючи на те, що одноканальний ємісний гравіметр має ряд переваг, таких як: лінійність вихідної характеристики; малі габарити та вага; висока чутливість та стійкість показань; також має і недоліки: невелика потужність вихідного сигналу; наявність шумів; недостатня точність у 1 мГал; наявність залишкових похибок. Основним недостатком одноканального ЄГ є наявність похибок спричинених впливом вертикальним прискоренням, а також інструментальними похибками. Новий двохканальний ємісний гравіметр, за рахунок встановлення двох симетричних одноканальних ЄГ майже повністю виключає вплив вертикального прискорення, а також зовнішніх фізичних факторів. Через це точність зростає в порівнянні з відомими авіаційними гравіметрами у 2 рази, до 0,5 мГал. Використання МЕМС технологій у приладобудування має значну роль, оскільки зменшення розміру перетворювачі, підвищення точності, мале енергоспоживання, висока технологічність, а також низька вартість при великій кількості виробів є дуже значущими факторами. Тому двохканальний ємісний МЕМС гравіметр являється на даній момент точним, функціональним та сучасним елементом автоматизованого навігаційного комплексу.

Список використаних джерел

1. UVS International = Міжнародної асоціації безпілотних систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://uvs-international.org/index.php?option=com_content&view=article&id=204&Itemid=284
2. Lum CW, Gauksheim K, Deseure C, Vagners J, McGeer T Assessing and estimating risk of operating unmanned aerial systems in populated areas. In Proceedings of the 11th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference. Virginia Beach. – 2011.
3. Scheduling S, Finn A Developments and challenges for autonomous unmanned vehicles: A compendium s.1. Springer Sci & Business 9. – 2010.
4. Hejduk M The use of unmanned aerial vehicles - drones supply courier. Thesis Inzynierska. Wroclaw. – 2015.
5. Drones and Possibilities of Their Using [Електронний ресурс] // ResearchGate. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/305273853_Drones_and_Possibilities_of_Their_Using.
6. Баринін, Ю. І. Метод переносу координат дрона на карту місцевості : магістерська дис. : 123 Комп'ютерна інженерія / Баринін Юрій Ігорович. – Київ, 2019. – 100 с.
7. Хильченко Т.В. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: дис. ... канд. техн. наук. : 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин / Т.В. Хильченко. – Одеса, 2019. – 228 с.
8. Безвесільна О. М. Авіаційні гравіметричні системи та гравіметри: монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – 604 с.
9. Безвесільна О.М. Вимірювання прискорень/ О.М. Безвесільна. –К.: Либідь, 2001. –261 с.

10. Быковский А.В., Полинков А.В., Арсеньев В.Д.
Аэрогравиметрический метод измерения гравитационных аномалий /
Быковский А. В., Полинков А. В., Арсеньев В. Д. // Авиакосмическое
приборостроение – 2013. №12. – С. 11–19.
11. Безвесільна О.М. Аналіз основних типів гравіметрів АГС /
О.М. Безвесільна, Л.О. Чепюк // ВІСНИК ЖДТУ. 2013. № 3 (66), с. 52-61.
12. Пат. 109746 Україна. Авіаційна гравіметрична система для
вимірювань аномалій прискорення сили тяжіння / О.М. Безвесільна, А.Г.
Ткачук, Л.О. Чепюк //Опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18.
13. Торге В. Гравиметрия: монография / В. Торге; Пер. Г.А. Шануров,
Ред. А.П. Юзефович. – М.: Мир, 1999. – 428 с
14. Опис до патенту на корисну модель, Гіронапівкомпас, UA 5413
МПК 2009 G01C 19/00.
15. Пат. 2253882 Россия, МПК G 01 V 7/02. Гравиметр / А.П. Быков,
О.Е. Енина, В.П. Кулеш, Л.М. Москалик.
16. Пат. 1121639 РФ, МПК G 01 V 7/12. Гравиметр / Е.И. Попов, В.П.
Матюнин, А.Б. Манукин, В.Н. Конешов, Л.К. Железняк, Г.А. Гусев. – заяв.
22.06.82; опубл. 30.10.84.
17. Авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій
прискорення сили тяжіння : пат. 105122 Україна: МПК G01V 7/00 /
Безвесільна О. М., Ткачук А. Г., Козько К. С. – заяв. 01.04.13; опубл.
25.12.13, Бюл. № 24. – 5 с.
18. О.М. Безвесільна, Гравіметр авіаційної гравіметричної системи
нового типу / О.М. Безвесільна, К.С. Козько, 2014.
19. Implications of Emerging Micro and Nano technology / Committee on
Implications of Emerging Micro- and Nano technologies, National Research
Council, 266 p, 2002.
20. . Безвесільна О. М. Прецизійний приладовий навігаційний комплекс
та його чутливі елементи. Монографія / Безвесільна О.М. – Київ: КПІ ім.
Ігоря Сікорського, ДП НВЦ «Пріоритети», 2019. – 451 с.

					ЛПБ ПМ6112 000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

21. Сысоева С. Автомобильные акселерометры. Часть 5. Перспективная элементная база поверхностных кремниевых ёмкостных MEMC – акселерометров [Электронный ресурс] / Режим доступа:http://www.kite.ru/articles/sensor/2006_4_28.php] – 26.01.2018 г. – Загл. с экрана.

22. Веселов, К. Е. Гравиметрическая разведка / К. Е. Веселов. – М.: Недра, 1968.– 512 с.

23. Gramert, W. R. Third generation aerogravity system // International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly –Boulder, Colorado, 1995.

24. Wei, M. Analysis of GPS-derived acceleration from airborne tests / M. Wei, K. Schwarz // International Association of Geodesy Symposium G4, IUGG XXI General Assembly, – Boulder, Colorado, 1995.

25. Годовицын И.В. Расчет и моделирование основных параметров дифференциального емкостного МЭМС-акселерометра / И.В. Годовицын, Д.А. Сайкин, Р.А. Федоров, В.В. Амеличев // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика А.Л.Стемпковского. М.:ИППИМ РАН, 2010. С. 642-647.

26. Современные МЭМС-гироскопы и акселерометры [Электронный ресурс] / Режим доступа:http://www.sovtest.ru/news/publications/sovremennye-mems_giroskopyi-akselerometry/ – 26.01.2017 г. – Загл. с экрана.

27. Безвесільна О. М. Двоканальний МЕМС гравіметр автоматизованої авіаційної гравіметричної системи: монографія / Безвесільна О.М., Хильченко Т.В. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ДП НВЦ «Пріорітети», 2017. – 181 с.

28. Безвесільна О.М., Козько К.С., Тимчик Г.С., Чепюк Л.О. Прецизійний чутливий елемент автоматизованої інформаційно-вимірювальної системи. Житомир : ЖДТУ, 2017. 208 с.

29. Коваленко, І. О. Метрологія та вимірювальна техніка: навч. посібник / І.О. Коваленко, А. М. Коваль. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 652 с.
30. Головка, Д. В. Метрологія та основи вимірювань / Д. В. Головка, К. Г. Рого, Ю. О. Скрипник – К.: Либідь, 2001. –407 с.
31. Безвесільна, О. М. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі Житомир: ЖДТУ, –пристрої приладів: підручник / О. М. Безвесільна, Г. С. Тимчик. 812 с.–2012.
32. Лозинская, А. М. Измерение силы тяжести на борту самолета / А. М. Лозинская. – М. : ВИАМС, 1978. – 70 с
33. Засоби вимірювання екологічних параметрів: підручник / Безвесільна О.М., Войницький А. П., Єльнікова Т. О. та ін.– Житомир: ЖДТУ, 2009. – 508с.
34. Mohinder, S. Grewal Global positioning systems, inertial navigation, and integration /Mohinder S. Grewal, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews – Hoboken, New Jersey : Wiley-interscience a John Wiley& Sons Inc., 2007. – 525 p
35. Іващенко, О. А. Дослідження двоканального сильнодемпфованого вимірювача : магістерська дис. : 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Іващенко Олена Андріївна. - Київ, 2018. - 127 с.
36. Козюков, Д. Д. Дослідження ємнісного МЕМС чутливого елемента стабілізації : магістерська дис. : 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка / Козюков Денис Сергійович. – Київ, 2019. – 92 с.
37. Безвесільна, О.М.; Красниця, Є.М., Ємнісний МЕМС чутливий елемент стабілізатора озброєння: II Міжнародна науково-технічна конференція. – ЖДТУ, 2017. - Режим доступу: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/7214>
38. Хильченко Т. В. Новий двоканальний МЕМС гравіметр авіаційної гравіметричної системи / Т. В. Хильченко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. - 2018. - № 1. - С. 162-168. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2018_1_26.